

# **Návrh Algoritmu koordinace napětí různými akčními členy v jednom uzlu ES**

Design of Voltage Regulation Coordination Algorithm by Different Action Component in one ES Node

**Bc. Jan Ďurica**

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.

Ostrava, 2021

# Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Jan Ďurica**

Studijní program:

N0713A060003 Elektroenergetika

Téma:

Návrh algoritmu koordinace regulace napětí různými akčními  
členy v jednom uzlu ES

Design of Voltage Regulation Coordination Algorithm by  
Different Action Component in one ES Node

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor sítí nadřazené soustavy ČR

2. Regulace napětí v nadřazené soustavě ČR, typy regulátorů

3. Regulace U/Q v elektrizační soustavě ČR a akční členy regulace U/Q v uzlu Krasíkov

4. Vytvoření elektrického modelu uzlu Krasíkov pro účely regulace U/Q v tomto pilotním uzlu

5. Návrh algoritmu koordinace modelovaných akčních členů

6. Simulační ověření regulace akčních členů v uzlu Krasíkov

7. Závěr, vyhodnocení řešení

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Kolcun M., Heger V., Mülbacher J. Electric Power System Operation Control, Mercury – Smékal Publishing House, Praha 2003

2. Habrych R.: Automatická sekundární regulace napětí, Energetika 2/2015

3. Technická dokumentace ČEPS, a.s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

---

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení**

Potvrzuji tímto, odevzdání své digitální kvalifikační práce. Prohlašuji, že jsem tuto kvalifikační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Bc. Jan Ďurica

## **Abstrakt**

Cílem této práce je sestavit algoritmus pro společnost ČEPS a.s., pro efektivní využití regulovatelné tlumivky při regulaci napětí pomocí regulace toků jalových výkonů v pilotním uzlu Krasíkov. Jsou zde vysvětleny základní pojmy a funkce přenosové soustavy a obecně je zde popsáno i její řízení včetně metod, které jsou v praktické části využívány. Podrobněji je popsáno i samotné sestavování algoritmu, včetně jednotlivých logických pochodů, při obměně jednotlivých součástí algoritmu. Jsou zde vyobrazeny průběhy regulace, jak reálně dosažitelných hodnot, tak i mezních hodnot, které jsou v reálném řízení přenosové soustavy více než vzácné.

## **Klíčové slova**

Algoritmus; přenosová soustava; řízení napětí; bilance toku jalových výkonů; regulovatelná tlumivka; Simulink; synchronní kompenzátor; Elektrárna Dlouhé stráně; PI zpětnovazební regulátor

## **Abstract**

The objective of this diploma thesis is to compile an algorithm for the company ČEPS a.s., for the effective use of a variable shunt reactor for voltage regulation in the Krasíkov pilot node. The thesis describes a fundamental concept of the voltage control process that is applied in transmission system. The algorithm is described in detail in chapter 5, including the individual components of the algorithm. The courses of regulation, both realistically achievable values and limit values, which are more than rare in real control of the transmission system, are shown here.

## **Keywords**

Algorithm; Transmission system; Voltage regulation; Reactive power flow balance; Variable shunt reactor; Simulink; Synchronous compensator; Pumped storage Dlouhé Stráně; PI loopback controller

## Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	7
Seznam obrázků a tabulek .....	9
Seznam rovnic .....	11
Úvod .....	12
1. Teoretický rozbor sítí nadřazené soustavy ČR .....	13
1.1 Řízení nadřazené sítě .....	13
Typy stožárů .....	14
Druhy vodičů .....	15
1.2 Elektrické stanice .....	15
Rozdělení elektrických stanic a rozveden .....	16
Transformátory .....	16
2. Řízení napětí v nadřazené soustavě ČR, typy regulátorů .....	18
Fyzikální princip .....	18
2.1 Metoda pilotních uzlů .....	18
2.2 Celkové řešení ASRN (automatické sekundární regulace napětí) .....	19
2.3 Anomální provoz ASRU (Automatické sekundární regulace napětí[U]) .....	21
Preregulování/Nedoregulování regulační odchylky .....	21
2.4 Podpůrná služba regulace jalového výkonu .....	22
Certifikace PpS (Podpůrných Služeb) .....	24
2.5 Typy regulátorů .....	24
Regulátory jalového výkonu .....	25
Regulátory ve spojitém složeném regulátoru PID .....	25
3. Regulace U/Q v elektrizační soustavě ČR a akční členy regulace U/Q v uzlu Krasíkov ..	28
3.1 Statické napěťové charakteristiky .....	28
3.2 Základy řízení regulace U/Q .....	30
3.3 Prostředky regulace U/Q .....	30
3.4 Závislost napětí na jalovém výkonu .....	31
3.5 Akční členy v pilotním uzlu Krasíkov .....	31
4. Elektrický model uzlu Krasíkov pro účely regulace U/Q v tomto pilotním uzlu .....	34
4.1 Elektrický model blokově .....	34
4.2 Sestavení algoritmu .....	35
Synchronní kompenzátor .....	37

Tlumivka .....	37
Elektrárna Dlouhé Stráně a extrémý.....	37
5. Návrh algoritmu koordinace jednotlivých členů .....	39
5.1 Odchylka napětí.....	39
Citlivost uzlu .....	39
Modelování odchylky.....	39
5.2 Vstup PI regulátoru .....	39
Hodnoty PI .....	40
5.3 Regulační členy .....	41
Synchronní kompenzátor.....	41
Regulovatelná tlumivka.....	43
EDS .....	44
6. Simulační ověření regulace akčních členů v uzlu Krasíkov.....	46
7. Závěr diplomové práce.....	52
Seznam literatury a informačních a ilustračních zdrojů .....	53

## Seznam symbolů a zkratek

AlFe – hliníkové lano s železnou duší

ASRN – automatická sekundární regulace napětí

$a_{ij}$  – koeficient citlivosti

C – kapacita

$\cos \phi$  – účinník

DS – distribuční soustava

dQ – derivace toku jalového výkonu

dU – derivace napětí

EDS – elektrárna Dlouhé Stráně

ERÚ – energetický regulační úřad

$e(t)$  – signál proměnný v čase

GIS – „gas insulated switchgear“ zapouzdřená elektrická stanice

kV – kilovolt

MVA – megavoltampér

MVAr – megavar

MW – megawatt

NN – nízké napětí

OPF – optimal power flow

P – činný výkon

PID – proporcionální integračně derivační, např. regulátor

PPPS – pravidla provozování přenosové soustavy

PRN – primární regulace napětí

PS – přenosová soustava

PpS – podpůrné služby

$r_i$  – integrační zvětšení

$r_0$  – proporcionální zvětšení

SF<sup>6</sup> – fluorid síry (izolační plyn)

SW – software

TRN – terciální regulace napětí

U – napětí

$U_{\text{krit}}$  – kritické napětí

$U_n$  – jmenovité napětí

VN – vysoké napětí

VVN – velmi vysoké napětí

X – reaktance

$x(t)$  – signál proměnný v čase

ZVN – zvláště vysoké napětí

$\Delta U$  – rozdíl napětí

$\omega$  – úhlová rychlost



## Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 Přenosová soustava a napěťové hladiny [15] .....	14
Obrázek 2 Typy stožárů [16] .....	14
Obrázek 3 Zapouzdřená elektrická rozvodna s nevodivým plynem [17] .....	15
Obrázek 4 Transformátor přenosové soustavy jednofázový [11] .....	17
Obrázek 5 Automatická sekundární regulace napětí [10] .....	19
Obrázek 6 Závislost napětí elektrické sítě na jalovém výkonu [18] .....	21
Obrázek 7 PID regulátor modul po modulu [19] .....	26
Obrázek 8 Statická napěťová charakteristika zdrojů točivých [9] .....	28
Obrázek 9 Statická napěťová charakteristika zdrojů statických [9] .....	28
Obrázek 10 Statická napěťová charakteristika zátěže [9] .....	29
Obrázek 11 Řízení a regulace napětí [9] .....	29
Obrázek 12 Regulace a řízení napětí [9] .....	30
Obrázek 13 Elektrárna Dlouhé Stráně [20] .....	32
Obrázek 14 Regulovatelná tlumivka [4] .....	33
Obrázek 16 Jednopolové schéma elektrické rozvodny Krasíkov [10] .....	34
Obrázek 17 Blokové schéma regulace pomocí PID regulátoru a zpětné vazby .....	34
Tabulka 2. Hodnoty PID regulátoru .....	40
Obrázek 18 Agresivní nastavení PI regulátoru ve funkci TUNE, čárkovaná je momentálně nastavenou hodnotu PI regulátoru a plná je nastavovaná .....	40
Obrázek 19 Robustní nastavení PI regulátoru ve funkci TUNE, čárkovaná je momentálně nastavenou hodnotu PI regulátoru a plná je nastavovaná .....	41
Tabulka 3. Hodnoty PI regulátoru, představující synchronní kompenzátor .....	42
Obrázek 20 Synchronní kompenzátor s přepínačem odboček a funkcí Gain, podle nastavené odbočky na transformátoru do DS .....	42
Obrázek 22 Detail tlumivky s předřazeným PI regulátorem, konkrétně první a hlavní stupeň s prvními 5 stupni .....	44
Detail tlumivky s předřazeným PI regulátorem, konkrétně první a hlavní stupeň s prvními 5 stupni .....	44
Obrázek 21 Tlumivka se všemi stupni .....	44
Tlumivka se všemi stupni .....	44
Tabulka 4. Hodnoty PI regulátoru, představující EDS .....	44
Obrázek 23 PI regulátor, představující EDS s předřazeným přepínačem .....	45
Obrázek 24 Princip algoritmu, včetně modelování „měřené“ hodnoty a přepočtů z Q na U a obráceně, včetně zobrazení připojení zpětné vazby z regulačních akčních členů .....	46

Obrázek 26 Stejný průběh změny jalových výkonů, ale při nižší citlivosti, kdy nemusí zasahovat tlumivka, protože ji EDS schopně zastoupí v tomto případě, znatelně spojitější doregulování.....	47
Obrázek 25 Celkový průběh napětí v tomto uzlu, při střídání různých proměnných bilance jalového výkonu a jejich doregulování bez přispění EDS. ....	47
Obrázek 27 Požadovaný jalový výkon +50 MVar, není pouze kompenzátořem dosažitelný, kvůli umístění v terciáru transf.....	48
Obrázek 28 Požadavek na +50 MVar, není pro kombinaci EDS a kompenzátořu, velký problém, i přes drobné kmitání.....	49
Obrázek 29 Požadavek na +48 MVar je pro synchronní kompenzátoř samotný téměř ideální hodnota jeho maxima .....	49
Obrázek 31 Opět požadavek -89 MVar, kdy není nutné tlumivku využít, díky přispění EDS	50
Obrázek 32 Požadavek na -120 MVar, což odpovídá maximálnímu vytížení regulovatelné tlumivky, které pomáhá synchronní kompenzátoř .....	50
Obrázek 30 Požadavek -89 MVar, kompenzované pouze tlumivkou s kompenzátořem, kde jsou vidět typické diskrétní skoky typické pro tlumivku .....	50
Obrázek 34 Požadavek na +180 MVar, je do 2 minut v požadovaných mezích, díky EDS a kompenzátořu .....	51
Obrázek 33 Požadavek -120 MVar, kdy je tlumivka použita pouze na nejnižší stupeň a zbytek je na EDS a kompenzátořu .....	51

## Seznam rovnic

Číslo rovnice	Název nebo funkce rovnice	Strana
(1)	Princip citlivosti sítě, závislost U na Q	18
(2)	Funkce proporcionálního členu	26
(3)	Funkce proporcionálního členu v %	26
(4)	Funkce integračního členu	26
(5)	Funkce derivačního členu	27
(6)	Součet všech funkcí v PID regulátoru	27
(7)	Rovnice pro netočivé zdroje jalového výkonu	28
(8)	Závislost napětí na jalovém výkonu	31
(9)	Napětí na konci vedení	31
(10)	Jalový výkon vyjádřený z předchozí rovnice	31
(11)	Úměra ke zkratovému proudu	31
(12)	Výpočet citlivosti obecně	35
(13)	Nižší citlivost uzlu = při provozu EDS	36
(14)	Vyšší citlivost uzlu	36

## Úvod

Tato práce byla zadána, na požadavek firmy ČEPS a.s., s ohledem na zprovoznění regulovatelné tlumivky v rozvodně Krasíkov. V této práci je v teoretické části popsána přenosová soustava, včetně elektrických stanic a zběžně i venkovní vedení. Popsáno je zde i řízení takovéto soustavy, včetně různých akčních členů, které se při regulaci používají a jak samotná regulace funguje. V práci je nadále vysvětlen způsob regulace za pomoci PID regulátoru, který je využíván i v praktické části této práce. Jsou zde sepsány i obecné informace a vše co vím o tomto pilotním uzlu a jeho možnostech regulace, včetně výpisu a vysvětlení kapacit regulačních a schématu pilotního uzlu Krasíkov.

V praktické části jsem vypsál veškeré regulační členy a jejich namodelování v algoritmu, včetně nahrazení některých chybějících funkcí. Jsou zde i zobrazené části samotného algoritmu, které jsou podrobněji osvětleny a pro zpřehlednění jsou přímo v obrázcích popisky. Pochopitelně jsou v této práci zobrazeny i přechodné jevy, vznikající na základě změny bilance toku jalových výkonů. Průběhy jsou zobrazeny jak v celkové návaznosti na sebe i zvlášť, pro lepší orientaci v grafech. Namodelovány jsou i krajní případy, které vyčerpají regulační kapacity na maximum. V průbězích je zohledněna i citlivost uzlu v návaznosti na Elektrárnu Dlouhé Stráně i jeho příspěvek k regulaci napětí v tomto uzlu.

## 1. Teoretický rozbor sítí nadřazené soustavy ČR

Přenosová soustava v České republice spadá pod správu společnosti ČEPS a.s. Tato společnost se stará o provoz vedení, které je již postaveno, ale také zadávájí externím firmám projekty na nové přenosové linky. Pod jejich správu spadají nejenom vedení, ale i rozvodny ZVN a VVN. Obecně se dá říct, že jejich sítě využívají výhradně napěťové hladiny 400, 220 výjimečně i 110 kV.

Nejčastěji spravují vedení o napěťové hladině 400 kV, které mají délku 3780 km z toho dvojité nebo vícenásobné vedení tvoří 1417 km. Předmětem této diplomové práce je uzel sítě Krasíkov, který je napojen na celkem 5 vedení 400 kV, první je z Týnce, další je vedeno z Prosenic, třetí z Neznášova, čtvrté z Horních Životic a na posledním vedení uzlu Krasíkov leží přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně. Pochopitelně v takovýchto bodech je nutné řídit pomocí akčních členů napětí, aby nekolísalo mimo dovolené rozpětí.

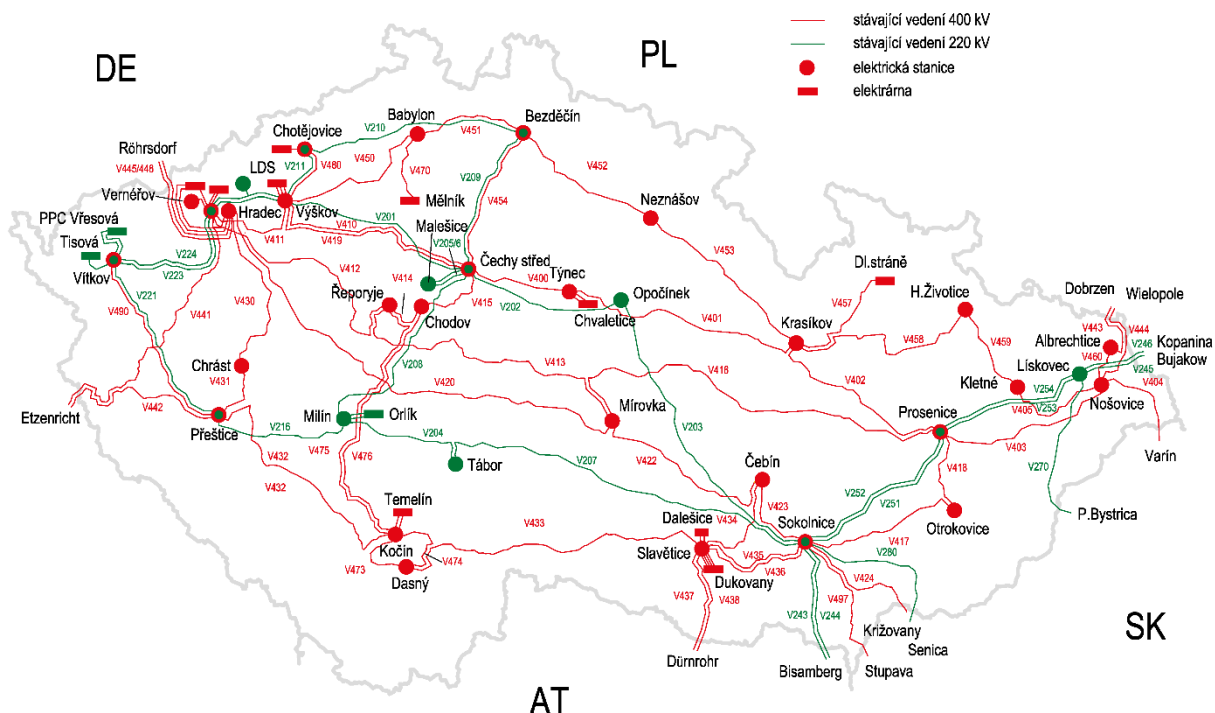
Nové sítě se v dnešní době příliš často neprojektují, naopak dochází ke zrekonstruování stávajícího vedení, kde se snaží společnost ČEPS a.s. vedení, pokud je páteří ideálně zdvojit a zvýšit přenosovou hodnotu napětí na 400 kV. Hodnota 400 kV je využívána na základě snížení ztrát přenosem vycházející z Ohmova zákona, protože tepelné ztráty odpovídají kvadrátu proudu.

### 1.1 Řízení nadřazené sítě

Celá přenosová síť je přesně a důsledně měřena a řízena v reálném čase. V Praze v sídle společnosti ČEPS a.s. je umístěno dispečerské centrum, odkud je celá přenosová síť řízena. Příslušní dispečeři mají přístupné veškeré údaje od napětí až po výkonové saldo. V podstatě se snaží výkony, které potřebujeme dopravit ke spotřebičům, popřípadě do jiného státu přes přenosovou soustavu sousední omezit vzhledem k vedení, a tak výkony odklání přes méně zatížené linky a snaží se vedení maximálně využít a přitom ho nepřetěžovat v rámci pracovní teploty, či silových účinků proudu. Samozřejmě celý proces je založený především na udržování hodnoty frekvence v provozních mezích.

K této práci mají vyhrazený SW, který jim pomáhá s řešením nenadálých situací, ať se jedná o odstavení elektrárny nebo zapojení většího výkonu v určitých částech republiky. Tyto výkyvy se pochopitelně musí ohlásit dopředu ať se předejde nevhodným přechodným jevům. Právě toto řeší tzv. Emergency dispečer, který dostává veškeré info o odstávkách, zapojení vyšších výkonů a komunikuje s dispečery sousedních států každý den a navzájem si pomáhají a můžeme třeba výkon, který potřebujeme ze severních Čech dostat do Ostravy využít Německou a Polskou přenosovou soustavu. Popřípadě můžeme přenášet energie ze severu Německa na jih Německa naší soustavou.

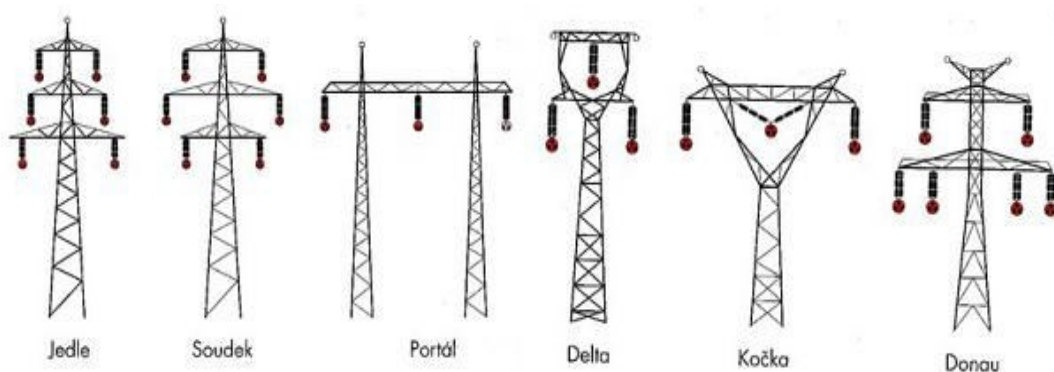
Pochopitelně mají dispečeři i rozvrhy a plány výroby elektrické energie a tato vyrobená energie se musí dopravit na místo smluvního určení. ČEPS a.s. právě spolupracuje s výrobcí elektrické energie a přenáší od nich elektrickou energii do distribučních soustav s co nejmenší ztrátou díky vyšší hladině napětí. V konečném důsledku se řeší i cena elektrické energie a může nastat případ, který byl výše popsal s přesunem elektrické energie ze severu Čech, třeba do Ostravy. Dispečeři musí všechny linky mít pod kontrolou a musí být maximálně zatíženy dovoleným limitem.



Obrázek 1 Přenosová soustava a napěťové hladiny [15]

## Typy stožárů

Elektrická síť je tvořena vedením, které je zavěšeno na stožárech. Nejčastěji se v dnešní době využívá typ stožáru Dunaj neboli Donau. Ovšem povětšinou se volí typ stožáru podle terénu a možností, které má každý stožár specifické. Druhů stožárů je nepřehledné množství ať se jedná o Soudek, Dunaj, Kočku, Portál, Deltu nebo Jedle.



Obrázek 2 Typy stožárů [16]

Stožáry se pochopitelně dělí i na kotevní a nosné stožáry, kdy kotevní mají mnohem hlubší základy a v podstatě natahují a propínají vodič, kdežto nosné vodiče ho pouze zdvihají a vzniká typický průhyb, se kterým se musí počítat při projektování, aby nebyl příliš blízko země, při terénních nerovnostech.

## Druhy vodičů

Drtivá většina vedení je realizována třífázově a všechny tři fázové vodiče včetně čtvrtého zemního vodiče nese stožár. V dnešní době už společnost ČEPS a.s. v lanu zemního vodiče umísťuje datové kabely pro rychlejší přenos informací ať už mezi jednotlivými elektrickými stanicemi tak už tento přenosový informační systém zrychluje přenos informací po celé PS. Vodiče jsou převážně tvořeny hliníkovými výjimečněji měděnými lany, které mají své číselné označení například lano 120 AlFe 6 označuje, že bude mít jmenovitý průřez  $120 \text{ mm}^2$  a poměr vodivého pláště ku duši lana je 6:1. Lana jsou využívány díky své pevnosti a snížení průřezu díky slaňování a kompresi.

Vodiče jsou většinou navzájem ovlivňovány např. vzájemnou indukčností a v případě, že jsou vedeny vedle sebe jako třeba u portálu, je nutné lana po určité vzdálenosti přeházet, aby byli symetricky zatěžované tzn. zákrut.

Pokud se jedná o vedení elektrické energie v elektrických stanicích přechází se na trubkové vodiče, které jsou odolnější, nemají prakticky průhyb a realizace trubkové elektrické stanice s rozvodnou s trubkovými vodiči zabere méně místa než s klasickými vodiči. Specifickou třídou u elektrických stanic jsou tzv. GIS. Jedná se o elektrické rozvodny, které jsou uzavřeny v plynovém potrubí a díky tomu je nízká přeskoková vzdálenost a celé rozvodny tím značně sníží svou plochu, navíc se dají realizovat nejen v parametrech délky a šířky, ale projektují se i do výšky, popř. hloubky.



*Obrázek 3 Zapouzdřená elektrická rozvodna s nevodivým plynem [17]*

## 1.2 Elektrické stanice

Pojem elektrická stanice je označení uzavřené elektrické provozovny, která je využívána na výrobu, přenos nebo přeměnu elektrické energie. Součástí elektrické stanice jsou většinou rozvodny, které jsou taktéž uzavřené technické celky, které mohou být ukryty v budově nebo na volném prostoru.

Rozvodny obsahují elektrické zařízení jako elektrické stroje a přístroje důležité pro rozvod a přeměnu elektrické energie.

#### Rozdělení elektrických stanic a rozvoden

Elektrické stanice se vždy staví za určitým účelem a tyto účely mohou být například:

- Transformovny (obsahuje výkonové transformátory a propojují dvě nebo více napěťových hladin.)
- Spínací stanice (rozdávějí elektrickou energii o stejné napěťové hladině bez její transformace.)
- Měnírny (můžou to být usměrňovací stanice, nebo třeba trakční měnirny pro používání elektrické trakce pro DC trakční soustavy např. 6 kV.)

Momentálně je součástí přenosové soustavy cca. 44 elektrických stanic z toho 4 stanice mají na starosti vazbu a propojení hladin 400 kV a 220 kV. Dále z těchto 33 stanic zajišťuje 32 stanic propojení přenosové soustavy na distribuční soustavu. 10 stanic zajišťuje vedení výkonu z elektráren a 8 stanic je složeno z rozvoden 400 a 220 kV.

Jak bylo výše zmíněno, jsou různé druhy rozvoden, podle použité technologie jsou děleny na klasické venkovní, zapouzdřené vnitřní, popřípadě hybridní. U každého typu je izolace řešena jinak. Venkovní využívají vzduch naopak vnitřní SF<sub>6</sub> o vyšším než atmosférickém tlaku a hybridní jsou kombinací.

#### Transformátory

V elektrických stanicích a rozvodnách jsou využívány transformátory ať už pro přeměnu napětí, měřicí účely nebo pro oddělení dvou soustav. Obecně se dělí využívané transformátory v rozvodnách na vazební transformátory 400/220 kV, do jejichž funkce spadá zajištění vazby dvou napěťových hladin a povětšinou mají výkon 500 MVA a na místě jsou umístěny vždy 4 jednotky z nichž jedna je rezervní v případě poruchy jedné ze tří používaných jednotek. Pak se zde vyskytují tzv. síťové transformátory 400(220)/110 kV, tyto transformátory mají na starosti vazby mezi přenosovou a distribuční soustavou, výkony bývají nižší většinou jsou v intervalu 200 až 350 MVA a jedná se o trojfázové jednotky, obvykle jsou na rozvodnách umísťovány 3 transformátory 350 MVA.

Nejběžnější kompenzační prostředky jsou bezpochyby tlumivky jak suché, napojené na terciéry transformátorů, tak už i olejové tlumivky využívané u napětí 400 kV.





*Obrázek 4 Transformátor přenosové soustavy jednofázový [11]*

## 2. Řízení napětí v nadřazené soustavě ČR, typy regulátorů

Co se týká obecného řízení napětí v přenosové soustavě, která jak bylo již výše zmíněno je spravována společností ČEPS a.s. je její řízení realizováno terciální regulací, následně automatickou sekundární regulací napětí a poté i primární regulací. Úkol tohoto systému je zřejmý udržovat průběžně stejnou bilanci jalových výkonů v jednotlivých uzlech přenosové soustavy pro dodržení v uzlech zadané hodnotě napětí. Těmto uzlům se říká tzv. pilotní uzel a je do nich vyveden výkon nejvýznamnějších elektráren různých typů a pochopitelně i různé regulační prostředky. Právě těmito prostředky je možno regulovat bilanci jalových výkonů a tím i napěťové poměry.

### Fyzikální princip

Celý princip je postaven na jediném vztahu vyplývajícím ze závislosti napětí na bilanci jalových výkonů:

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (1)$$

Kde  $\Delta U_i$  je změna napětí v daném uzlu,  $a_{ij}$  je tzv. koeficient citlivosti v uzlu i vzhledem ke změně jalového výkonu j a nakonec  $\Delta Q_j$  je změna jalového výkonu v uzlu j.

Z tohoto vztahu je zřejmé, že pro změnu napětí je nutno regulovat jalový výkon v uzlu ať už potřebujeme bilanci jalového výkonu zvýšit, či naopak snížit. Velikost této změny je daná koeficientem citlivosti, který je pro každý pilotní uzel rozdílný a sice při vyšším citlivostním koeficientu je změna napětí větší. To znamená, že pokud slabý zdroj jalového výkonu umístíme na citlivý bod, tak můžeme dosáhnout stejného výsledku jako umístění zdroje velkého jalového výkonu v méně citlivém bodě přenosové soustavy. Proto je nutné při řízení napětí zohlednit právě tento citlivostní koeficient v daném uzlu a rozhodnout se o efektivnosti regulace v určitých pilotních uzlech.

### 2.1 Metoda pilotních uzlů

Pilotní uzel je charakterizován jako regulovaný uzel v řešené soustavě, kde musíme brát v potaz jeho citlivostní koeficient a je považován za jediné místo, kde může být bezpečně řízeno napětí bilancí jalových výkonů, aniž bychom museli sledovat napěťové poměry v sousedících uzlech. Takže nám pilotní uzel představuje celou regulovanou soustavu.

Je možné regulovat napětí přímo tzv. na patě elektrárny za blokovým transformátorem, ale nejedná se o stabilní a efektivní řešení jako v pilotním uzlu a složitě se počítá zadané napětí s ohledem na rozdělení jalových výkonů, aby byly pokud možno optimálně rozděleny.

Pokud bychom regulovali napětí v odběrovém uzlu je řízení napětí mnohem složitější a značně ztrácí na efektivitě, protože musíme zahrnout i velké množství omezujících podmínek, což degraduje regulaci v tomto odběrném uzlu.

Proto se dá říct, že pilotní uzly mají po celou dobu napětí na zadané hodnotě v požadované toleranci i pokud se změní bilanční toky jalových výkonů. Další věc, která je pro pilotní uzlu podstatná je, že pilotní uzel si drží své napětí a nenechá si vnutit dlouhodobě jiné napětí, než je jeho zadané

napětí, protože je na něm možné rychle pomocí kompenzačních členů regulovat jalový výkon a tím i napětí přímo v pilotním uzlu a tím eliminovat napěťové odchylky, třeba ze sousedních uzlů soustavy. Samotný uzel by měl mít dostatek regulačních prostředků pro regulaci napětí při různých očekávaných stavech v síti.

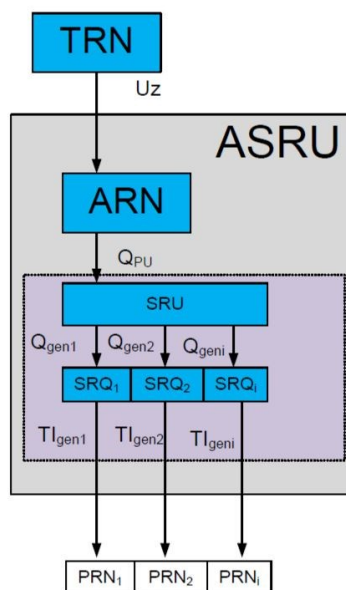
Pilotní uzel musí splňovat spoustu požadavků. První z nich je, že se nachází v místě, kde je klasická rozvodna s přípojnici. Musí být do tohoto uzlu zapojený významný odběrový uzel kvůli vyšší stabilitě napětí, než kdyby zde odběrový uzel napojený nebyl. Připojení zdroje elektrické energie přímo do uzlu pro možnost sledování omezovacích podmínek dané rozvodnami mezi zdrojem a uzlem z jiné soustavy. Pochopitelně pro kvalitní a efektivní řízení musíme měřit přesně napětí v tomto uzlu abychom neregulovali uzel, který je pouze špatně změřen. Pilotní uzel musí mít oproti normálnímu uzlu také možnost průběžného určení derivace  $dU/dQ$  určené z Jacobiho matice.

Může se stát, že v jedné rozvodně vznikne vícero pilotních uzlů. Jejich počet je odvozen od počtu přípojníc vyhodnocované rozvodny, počtu připojených akčních členů, počtu příčných a podélných dělení přípojníc. U některých složitějších elektrických rozvodnů může být problém určení jednotlivých aktuálních pilotních uzlů kvůli složité topologii rozvodny obzvláště při náhradních zapojení rozvodny při revizích, popřípadě opravách.

## 2.2 Celkové řešení ASRU (automatické sekundární regulace napětí)

Celý princip je postaven na modelu soustavy se zpětnou zápornou vazbou, což je naproti regulaci řízení účinníku rozhodně značnou výhodou.

Systém ASRU je nastaven, aby udržoval stálou hodnotu zadaného napětí. Ovšem tato hodnota napětí musí být zadána podle požadované vypočtené hodnoty pro fungování celého systému ASRU. Většinou se zadání dá rozlišit podle způsobu. Prvním je pevně zadaná hodnota napětí v uzlu, druhým je ruční změna zadané hodnoty napětí a poslední a třetí je programová změna zadané hodnoty napětí.



Obrázek 5 Automatická sekundární regulace napětí [10]

Nejdříve se budu zabývat prvním případem a sice pevně zadanou hodnotou napětí. Nejčastěji se využívá u soustav VN, protože v nich nelze efektivně optimalizovat tok jalového výkonu pomocí změny zadaného napětí. Důvod této neschopnosti je radiální charakter soustavy, a především existence transformátorů VN/NN bez odboček, kdy nemůžeme regulovat napětí pomocí transformátorů. Proto je nutné u těchto uzlů držet napětí VN, aby odpovídalo jmenovitému napětí na straně NN. ARSU se v soustavách VN využívá tedy pouze a výhradně na napěťovou stabilizaci a v důsledku i kvality odevzdávané elektrické energie odběratelům. Změnu této teorie mohou docílit pouze s transformátory VN/NN s přepínáním odboček pod zatížením.

Pokud se jedná o ruční změnu zadané hodnoty napětí, tak tu provádí sám dispečer soustavy, pochopitelně z ústředního dispečinku. Koná tak na základě rozvrhnutých plánů a výpočtů pro potřeby funkčnosti sítě. Jedná se děj výhodný pro méně dynamicky proměnné soustavy, kde není pravděpodobné dosažení významnějšího snížení technických ztrát optimalizací toku jalového výkonu a postačují zde pouze drobné ruční úpravy zadaného napětí.

Pokud se bavíme o terciální regulaci napětí a programové změně zadané hodnoty napětí je tato nová hodnota počítána z programu, který spadá do kategorie OPF neboli Optimal Power Flow. A to buď programem určeným pouze pro optimální rozložení toků jalového výkonu v soustavě, popřípadě komplexnějším systémem spadajícím do kategorie SCOPT, kde je samotná změna v pilotním uzlu součástí několika realizovaných změn.

Samotný výpočet zadané hodnoty může probíhat buď periodicky, podle nastaveného časového intervalu, který je nastaven vzhledem k důležitosti a rychlosti změn v soustavě. Poté se změna zadané hodnoty může změnit na základě pokynu dispečera, kdy se dispečer může rozhodnout pro zlepšení stability nebo efektivnějšího využití sítě, ovšem musí počítat se všemi proměnnými, na které by měl program, ve kterém se hodnota upravuje upozornit. Poslední možnost změny zadané hodnoty je porucha, popřípadě zapnutí či vypnutí vedení, nebo nenadálé odstavení zdroje, či naopak zapojení zdroje.

Změny se provádí pouze z důvodů efektivního a ekonomického, tudíž jsou realizovány pouze pro dosažení prokázaných úspor na technických ztrátách, aby nedocházelo ke změnám, které neovlivňují kvalitu sítě a pouze znamenají ekonomické zásahy do ovládání soustavy.

U ASRU je nutné znát toleranci zadaného napětí, aby nedocházelo ke změnám kvůli malým regulačním odchylkám, a tudíž i hystereze, která má toto na starost zlepšuje stabilitu soustavy, protože reguluje zbytečné zásahy regulace. Ovšem tato tolerance nebo citlivost se volí s ohledem na citlivost regulátorů, abychom ji nesnížili. A proto u sítí s různými napěťovými hladinami je tato tolerance nastavená takto:

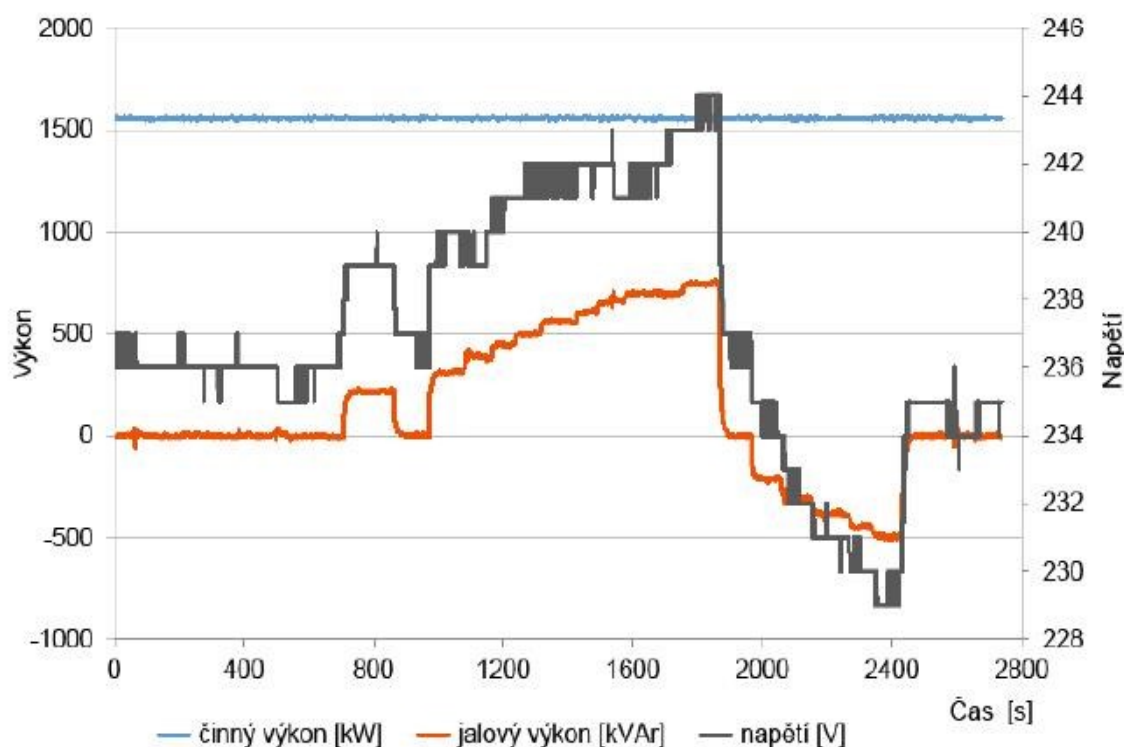
- 400 a 220 kV má toleranci  $\pm 0,5$  kV
- 110 kV má toleranci  $\pm 0,25$  kV
- 22 kV má toleranci  $\pm 0,11$  kV

### 2.3 Anomální provoz ASRU (Automatické sekundární regulace napětí[U])

Obecně navrhnutí, realizace a parametrizace u regulace ASRU je značně náročná a vyžaduje simulační dynamický model a pečlivý přístup především, co se týká návrhu. Při sebemenší chybě může docházet k anomálním provozním stavům, které budou zde rozepsány a popsány jejich příčiny i důsledky.

#### Přeregulování/Nedoregulování regulační odchylky

Viníkem můžou být technické problémy na straně regulované technologie, což může být například vada na PRN generátoru, třeba může přestat reagovat na povely regulačních členů ASRU. Dalším viníkem je chybný výpočet regulační rezervy Q, který je špatně nepřesně namodelovaný, který rozšiřuje regulační pásmo ASRU jalového výkonu než je reálně k dispozici. Další špatnou možností je při anomálním provozním měnit zadanou hodnotu, záložní generátory při nevhodně nastavené zadané hodnotě dokáží velice rychle síť rozkmitat, protože se bude chvílemi síť přeregulovávat nebo nedoregulovávat. Přeregulováním vznikne kmitočet, který může přerůst přes možnosti regulace. Dalším možným viníkem je špatně určený poměr  $dQ/dU$ , kdy opět může síť být přeregulovaná, popřípadě nedoregulovaná.



Obrázek 6 Závislost napětí elektrické sítě na jalovém výkonu [18]

Pokud je v ASRU zařazeno příliš mnoho akčních členů, můžou způsobovat výkyvy, který musí pokrýt jiné akční členy a tzv. eliminovat reakci regulátorů jinými regulátory, které jsou v systému ASRU využívány a mnoho členů snižuje kvalitu a bezpečnost soustavy. Nové technologie fungující na pouze podobném principu mohou v daném zapojení generovat sekundární negativní efekty, nebo nějak narušovat současnou spolupráci jiných akčních členů.

Může se při určitých situacích stát, že vznikne extrémně velké množství regulací v pilotním uzlu, ačkoliv nejsou všechny potřeba. Toto může být způsobeno již výše zmíněnou změnou zadané hodnoty při anomálním provozním jevu, příliš úzkým regulačním pásmem, pro takové udržení v úzkém pásmu regulujeme neustále. Soustava může být také hodně dynamická, což se nám také při regulaci projeví a poté poslední uvažovaná možnost, kdy se dva pilotní uzly, které jsou umístěny blízko sebe přetahují neustále.

Pokud je zadaného napětí vypočtena špatně, ASRU tuto změnu nerealizuje z důvodu nedostatku zdrojů, popřípadě spotřebičů jalového výkonu, tedy z důvodů značného nedostatku realizačních mezí. Pokusí se pouze v rámci svých mezí dodržet tento chybně zadaný parametr, který lze snadno odvodit vzhledem k rychle se měnícím hodnotám přetoků jalového výkonu u blízkých vedeních a zvýšením technických ztrát v regulované soustavě.

Pokud nastane anomální jev, který byl na našem území již zaznamenán roku 2006, není nutné vypnout ASRU, ale stačí omezit práva programu pro automatickou změnu žádané hodnoty podle optimálního rozložení toků jalových výkonů v síti. V tomto momentu si dispečer musí žádanou hodnotu nastavit a stabilizovat napětí v mezích pro technickou realizaci. Pokud se jedná o krizi jde hospodárnost stranou a vše je na dispečerském týmu, který musí soustavu stabilizovat z důvodů možných přetoků jalových výkonů, výpadků nebo ostrovnímu režimu elektrárenských bloků. Přesto je ASRU manuálně využívána a její možnosti jsou maximálně využívány pro stabilizace a obnovu žádané hodnoty napětí.

## 2.4 Podpůrná služba regulace jalového výkonu

Dříve se regulace napětí a jalových výkonu považovala za jednoznačně čistou technickou disciplínu. Elektrárny dodávali do sítě za dohodnutých podmínek regulační jalový výkon a ten sloužil pro řízení napětí, pro zlepšení kvality elektrické energie pro odběratele. Obchodní aspekt získala tato regulace až po vzniku společnosti ČEPS a.s., kde se následně musela řešit pravidla pro elektrárny vzhledem k výrobě jalových, ale i činných výkonů. Z tohoto důvodů zde vznikla právě již zmíněná podpůrná služba regulace jalových výkonů, která je ročně dotována Cenovým výměrem ERÚ (Energetický regulační úřad).

Obecně pojato jsou systémové služby poskytované společností ČEPS a.s. důležité pro kvalitní a spolehlivé dodávky elektrické energie, konkrétně na úrovni PS pro dodání elektřiny do distribučních sítí, popřípadě koncových spotřebitelů. Kvalita je v přenosové soustavě brána jako stálá frekvence neboli kmitočet a pochopitelně i hladina napětí, které jsou definované Pravidly provozování přenosové soustavy neboli zkráceně PPPS. Obecně nepřerušitelnost dodávek elektrické energie nám definuje spolehlivost PS vzhledem k odběrným místům, počítáno podle průměrného počtu a trvání jednotlivých výpadků, v určených místech.

Dalo by se vložit do systémových služeb především jako:

- udržování kvality elektrické energie od zdroje až po koncového spotřebitele.
- udržování výkonové rovnováhy v reálném čase pro stálost a stabilitu sítě, kterou můžou přetoky výkonů podle jejich velikosti ovlivňovat.
- případné obnovení provozu při větším výpadku je nutné síť opět obnovit, obzvláště pokud je odpojen velký zdroj nebo odběratel elektrické energie
- dispečerské řízení, které pomáhá udržovat právě již výše zmíněnou frekvenci PS a výkonové saldo a pochopitelně i pomocí regulátorů korigovat a udržovat hladinu napětí.

Tyto podpůrné služby jsou hrazeny, jako součást ceny za elektrickou energii všemi odběrateli sítě, a tudíž všemi co využívají tyto služby, jinými slovy tyto služby jsou hrazeny zákazníky, výrobci připojenými na PS. Tyto služby jsou hrazeny distribučním společností, které tyto služby zase zaplatí společnosti ČEPS, a.s., která podpůrné služby poskytuje. Cena těchto služeb je stanovena vždy Energetickým regulačním úřadem (ERÚ), konkrétně vydáním Cenového rozhodnutí pro příští rok.

Všechny podpůrné služby musejí splňovat obecné požadavky, kterými jsou zaprvé měřitelnost pomocí kvantitativních parametrů. Zadruhé garance dostupnosti během cyklů od denního až po roční. Zatřetí certifikovatelnost, kdy musí být prokázáno, že tyto služby mohou být prováděny i periodicky a prokazatelně docílit jejich funkčnosti. Poslední požadavek je možnost průběžné kontroly těchto dodávaných služeb. Tyto složité kritéria splňují synchronní generátory a kompenzátory, ovšem je třeba brát v potaz, že podmínky jsou v současné době mimo možnosti parků větrných elektráren, o jejichž zapojení se v delším časovém horizontu uvažuje. Také je ale třeba říct, že u větrných parků by byla regulace U/Q byla splněním nutných podmínek pro připojení nikoliv podpůrných služeb.

Sekundární regulace U/Q může být poskytována provozovateli elektrárenských bloků připojeným do přenosové soustavy, pokud jejich instalovaný výkon dosáhne, anebo převýší hodnotu 50 MW a pochopitelně splní podmínky PPPS. V současné době je do ASRU zařazeno do osmi pilotních uzlů PS okolo 14 elektrárenských bloků. V mnou řešeném pilotním uzlu je již zmíněná přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně. Tyto služby můžou poskytovat i elektrárenské bloky zapojené do distribuční sítě 110 kV, kam patří třeba elektrárny a teplárny Dětmárovice, Třebovice, Mělník 1, Mělník 2, Kladno, Ledvice, Komořany, Trmice a Opatovice. Tyto výroby dodávají tyto služby distribuční soustavě nikoliv přenosové soustavě.

Výrobci mají s těmito poskytovanými službami náklady s instalováním, udržováním a modernizací nutných technických prostředků v rámci bloku pro systém ASRU. Náklady a přiměřený zisk z poskytování podpůrných služeb jsou poskytovateli hrazeny v rámci oceňování podpůrných služeb. Finanční ohodnocení jednotlivých poskytovatelů těchto podpůrných služeb je dáno pomocí tzv. certifikovaného regulačního rozsahu jalových výkonů, disponibilita, popřípadě může hrát roli i lokalita zdroje, která může v blízkosti větších poskytovatelů cenu snížit, anebo v případě umístění tohoto poskytovatele v místě, kde by byl v určitém rozumném okruhu sám poněkud i cenu navýšit.

U podpůrných služeb se nedá rozhodně říct, že by se obchodovalo s dodávaným, popřípadě odebíraným jalovým výkonem v MVar, ale právě naopak s dobou regulační rezervy jalovým generátorem. Navíc se neuvažuje, jestli byl tento výkon vůbec využíván, platí se za to, že certifikovaný výkon je ASRU k dispozici, a nikoli využívaný čas, popřípadě velikost odebíraného, nebo spotřebovaného jalového výkonu. Obecně smlouva o poskytování těchto podpůrných služeb je sepsána mezi společností ČEPS a.s., která má na starosti ASRU a poskytovatelem této podpůrné služby, který je vyveden do přenosové sítě a připojen do systému ASRU, opět se ovšem musí dodržet podmínky PPPS. Cena dohodnutá ve smlouvě je daná jako pevná platba za každou hodinu poskytování služby a za 1 MVar smlouveného certifikovaného regulačního rozsahu, podle vyhodnocení.

#### Certifikace PpS (Podpůrných Služeb)

Dříve se zjišťovali reálné možnosti elektráren, popřípadě jednotlivých bloků dvěma typy měření v oblasti řízení jalového výkonu. Jednalo se o měření stability generátoru a vypínací zkoušky generátoru. Právě na základě těchto měření vznikly zkušenosti, které se staly zdrojem pro formulaci požadavků na obecný proces certifikace. Tyto zkušenosti upřesnily chování jednotlivých generátorů v mezních stavech provozního diagramu, ale pochopitelně i omezení u výroben a sice na jejich vlastní spotřebě.

Certifikace je nutná, protože samotné čerpání jalových výkonů ať už ze synchronního generátoru neprobíhá podle provozního diagramu, alespoň obvykle, který je dodáván výrobcem, protože jsou zde zohledněny další podmínky a omezení, které jsou dány samotným zapojením a technickým stavem jednotlivého zdroje.

Samotné měření je prováděno certifikačními autoritami, které mají odpovídající pověření, které bývá časově omezené, dobou platnosti. Certifikační autorita provádí měření a uzavírá s provozovatelem elektrárny smlouvu o provedení certifikačního měření a vypracování protokolu a následně i certifikátu podle platné legislativy.

### 2.5 Typy regulátorů

Obecně platí, že v elektrických sítích se, jak je výše zmíněno reguluje napětí pomocí jalového výkonu. V této kapitole shrnu obecně tyto regulátory a popíšu jejich možnosti z hlediska výroby, popřípadě spotřeby jalového výkonu. Následně zde uvedu i typy regulátoru ve smyslu algoritmických regulátorů pro řízení napětí regulátory jalových výkonů. V podstatě popíšu, na jakém principu fungují regulátory logických veličin, které spouštějí regulátory jalového výkonu, které ovlivňují napěťovou hladinu a následně přes zpětnou vazbu mění logické hodnoty pro první regulátory, které můžou upravit, popřípadě zastavit regulaci regulačních členů jalového výkonu pro ustálení určité napěťové hladiny.



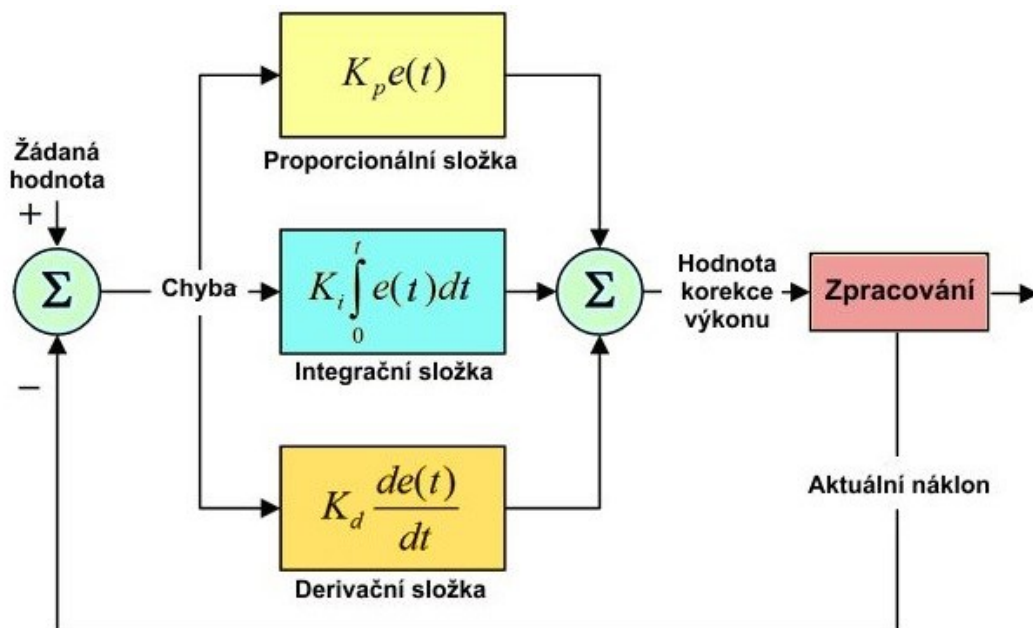
## Regulátory jalového výkonu

Jako regulátor jalového výkonu se považují transformátory (díky přepínání počtu odboček), synchronní kompenzátory, synchronní generátory, tlumivky, statické kondenzátory, zatížení, popřípadě venkovní i kabelové vedení.

- Transformátor je brán především jako spotřebič jalového výkonu. Ztráty v transformátoru se dají obecně rozdělit na ztráty naprázdno a nakrátko.
- Synchronní kompenzátor je rotační elektrické zařízení především bráno jako spotřebič jalového výkonu. Využívají se v elektrických sítích, anebo u velkých odběratelů. Pokud bude synchronní kompenzátor fungovat v podbuzeném stavu může absorbovat jalovou elektrickou energii.
- Synchronní generátory jsou brány jako čistý zdroj jalového výkonu v elektrických sítích.
- Tlumivky se využívají k spotřebě jalového výkonů, především kapacitního. Velkou roli hrají v přenosové soustavě kvůli nutnému odlehčení sítě při střídání dne a noci.
- Statický kondenzátor je také zdroj jalové energie. Velikost dodávaného výkonu je možné měnit díky přepínání jednotlivých stupňů. Jsou využívány z důvodů nízkých činných ztrát.
- Zatížení se může v elektrické síti chovat i jako zdroj i jako spotřebič jalové energie, záleží na charakteru zatížení. Dříve dle obecně daných požadavků mělo zatížení být do sítě připojeno pouze tehdy je-li jeho účinník vyšší než 0,95 což dnes již neplatí.
- Venkovní a kabelové vedení mohou být zdrojem i spotřebičem jalové energie. U kabelových vedení se většinou počítá, že se chovají jako zdroj jalového výkonu, naproti tomu venkovní vedení je bráno většinou jako spotřebiče jalové energie, pokud se nejedná o vedení, které pracuje pod přirozeným výkonem.

## Regulátory ve spojitém složeném regulátoru PID

Obecně se dají tyto regulátory rozdělit podle mnohých důvodů, ať už se jedná o druhy výstupního signálu, druhu konstrukčního provedení nebo třeba přenosových vlastností. Jsou zde popsány regulátory spojitě, které jsou součástí složeného regulátoru PID, které jsou využity při tvorbě algoritmu.



Obrázek 7 PID regulátor modul po modulu [19]

Mezi spojité regulátory složeného PID regulátoru patří nejdříve proporciální regulátor nazývaný často jen jako P regulátor. Vstupní signál se nám v podstatě zvětší. Proporciální regulátor funguje jako obyčejný zesilovač, a tudíž je vstupní signál přímo úměrný regulační odchylce. Tzv. činitel zesílení neboli konstanta zesílení nám udává zesílení vstupního signálu právě touto hodnotou. Vytváří nám stálou regulační odchylku, která pokud není příliš poměrově velká ku regulované veličině, může zlepšit fungování regulátoru. Často se využívá tzv. pásmo proporcionality, které je nejčastěji udáváno v procentech a ukazuje nám o kolik se musí vstupní signál změnit, aby se výstupní změnil v celém rozsahu.

$$x(t) = r_0 e(t) \quad (2)$$

$$pp = \frac{1}{r_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

Druhým spojitým regulátorem obsaženým v regulátoru PID je integrační složka neboli zkráceně I regulátor. Zde je vstupní veličina přímo úměrná integrálu regulační odchylky a před integrál je předřazeno zesílení integračního regulátoru označované jako  $r_i$ . Pokud se jedná o technické využití, tak se spíše setkáme s časovou konstantou  $T_i$ , než se zmíněným zesílením  $r_i$ .

$$x(t) = r_i \int_0^t e(t) dt + x(0) \quad (4)$$

Pokud by tento regulátor v fungoval jednoduché soustavě, je schopen eliminovat regulační odchylku. Ovšem oproti proporcionálnímu regulátoru je pomalejší a soustava může mít horší stabilitu.

Poslední spojitý regulátor, který je součástí PID regulátoru je derivační regulátor, pochopitelně opět zkráceně D regulátor. Opět je akční veličina přímo úměrná regulační odchylce, ale v tomto případě její derivaci. Jelikož čistá derivace je prakticky nerealizovatelná, mluvíme o ideálním D regulátoru. V mnoha případech se ani tato složka nepoužívá a výsledný regulátor je tedy pouze PI, protože D regulátor zesiluje šum. Proto se ani nikde samostatně nevyužívá.

$$x(t) = r_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

PID regulátor je tedy prostým součtem jednotlivých P, I a D regulátorů. Na začátku při regulování PID regulátorem převládá vliv derivační složky a postupem času získává integrační složka větší vliv.

$$x(t) = r_0 e(t) + r_i \int_0^t e(t) dt + x(0) + r_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Jak je již výše zmíněno, často se používají redukované verze PID regulátoru jako PD, PI, či dokonce P regulátor. Pokud potřebujeme konkrétnější regulaci o vyšší přesnosti můžou se využít modifikované verze PID regulátoru jako třeba PIDD<sup>2</sup>, PID nevyužívající celá čísla nebo PID regulátor řízený zpětnou vazbou a událostmi v řízené soustavě.

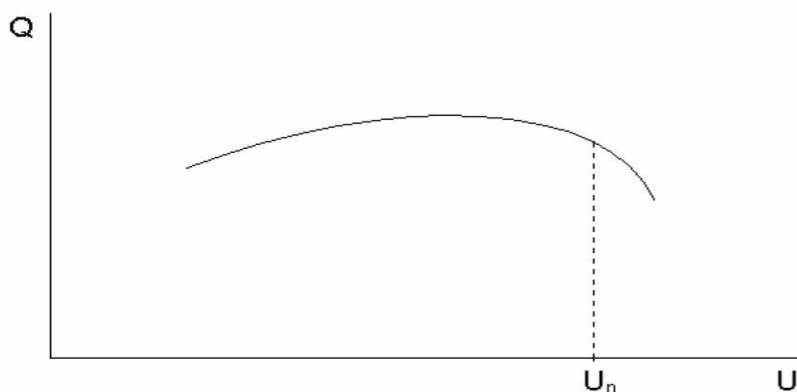
### 3. Regulace U/Q v elektrizační soustavě ČR a akční členy regulace U/Q v uzlu Krasíkov

Elektrizační soustava má dva různé regulační „páry“ a sice frekvenci, která je úzce spjata s činným výkonem a navzájem se ovlivňují a poté napětí a jalový výkon. Tudiž na hodnotu napětí má vliv bilance jalových výkonů. Při regulaci napětí za pomoci jalových výkonů se pohybujeme po tzv. statických napěťových charakteristikách, které se dělí na statické napěťové charakteristiky zdrojů a statické napěťové charakteristiky zátěže.

#### 3.1 Statické napěťové charakteristiky

V soustavě se jalový výkon získává ze synchronních generátorů, synchronních kompenzátorů, statických kondenzátorů a vedení, které pracují pod přirozeným výkonem a lze je považovat za zdroje kapacitního jalového výkonu.

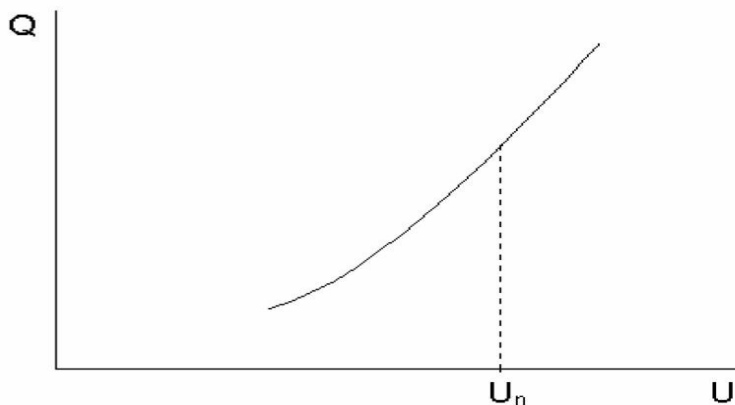
Točivé zdroje z vyjmenovaných mají svou statickou napěťovou charakteristiku odvozenou z fázorového diagramu synchronního generátoru.



Obrázek 8 Statická napěťová charakteristika zdrojů točivých [9]

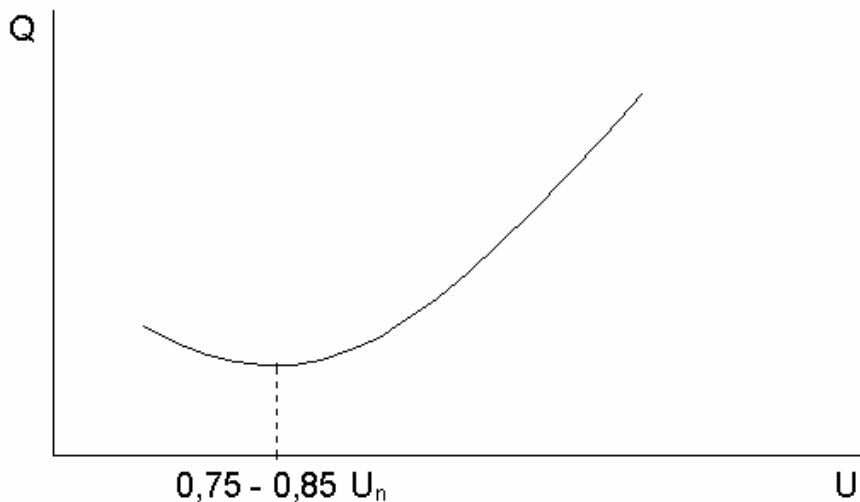
Naopak netočivé zdroje jalového výkonu jako statické kondenzátory a vedení pod přirozeným výkonem je tvar statické napěťové charakteristiky jiný a je úměrný čtverci napětí.

$$Q = C \cdot U^2 \cdot \omega \quad (7)$$



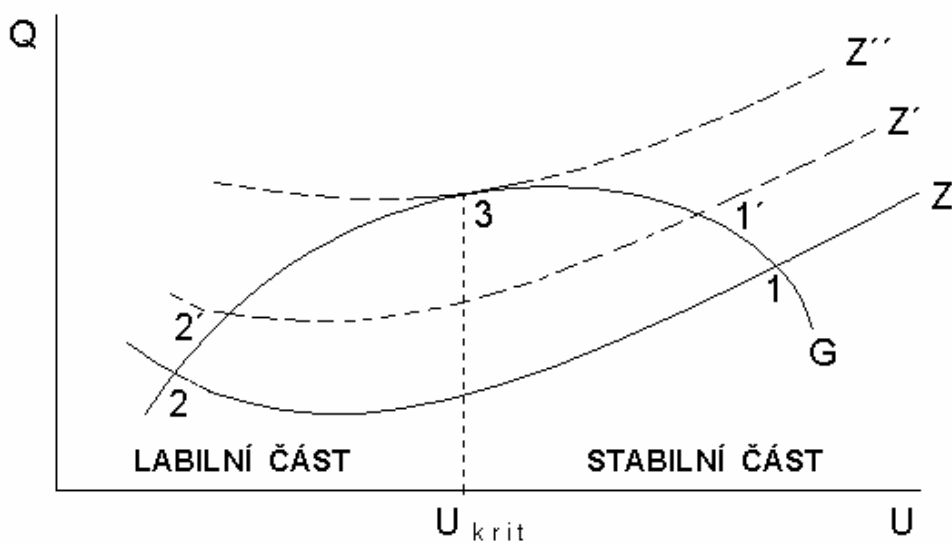
Obrázek 9 Statická napěťová charakteristika zdrojů statických [9]

Pokud se jedná o statické napěťové charakteristiky zátěží, pak je daná největšími spotřebiči jalového výkonu a sice transformátory a vedením VVN nad přirozeným výkonem. Nejvíce však spotřebují transformátory a to až 70 % jalového výkonu v elektrizační soustavě, průběh této charakteristiky je ovlivněn především tím, že největší složka jalového výkonu je určena pro magnetizaci a tento jalový výkon je značně závislý na napětí.



Obrázek 10 Statická napěťová charakteristika zátěže [9]

Pokud se bavíme o stabilní soustavě, tak její provoz je dán průsečíkem právě zmíněné stabilní napěťové charakteristiky zdrojů a statické napěťové charakteristiky zátěže. Následně ze vzniklého grafu je možné zřetelně rozdělit charakteristiky na část stabilní a labilní v závislosti na její trvalejší udržitelnosti. Stabilní a labilní část je oddělena pouze kritickým napětím, které nám ukazuje nejnížší napětí, které nám dokáže „udržet“ soustavu stabilní, pokud klesneme pod tuto hodnotu pak s největší pravděpodobností, klesne napětí a tím se celá síť zhroutí.



Obrázek 11 Řízení a regulace napětí [9]

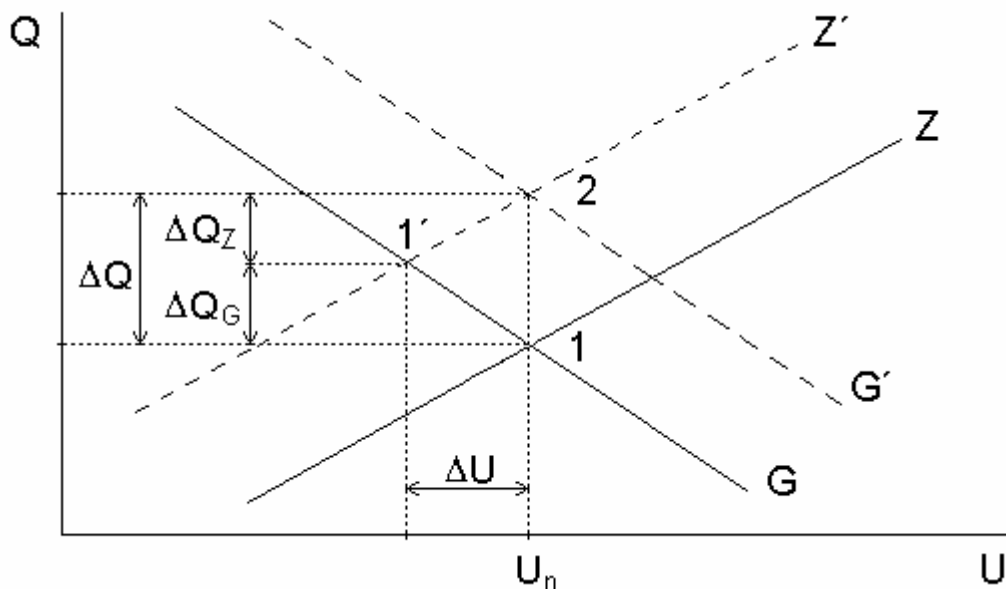
### 3.2 Základy řízení regulace U/Q

U vedení ať už kabelového nebo vzdušného je maximální hladina napětí dána izolací vodiče a pochopitelně i ztrátami v železe u transformátorů. A právě spodní mez je dána kritickým napětím, a tudíž i stabilitou soustavy.

U obvyklých distribučních sítí se bavíme o odchylce, která je určena dle napěťové hladiny. Ovšem tato práce se zabývá především přenosovou sítí, kde je dovolená odchylka  $-10\%$  až  $+5\%$   $U_n$ . Tudíž nejnižší hodnota třeba v síti 400 kV je 360 kV a naopak nejvyšší je 420 kV.

Tyto změny napětí se projevují i na spotřebičích, na které toto napětí přivedeme. Kolísání napětí třeba znatelně ovlivňuje svítivost žárovky. Podobný ovšem ne tak znatelný pokles svítivosti se snížením napětí probíhá i u zářivek. A třeba u asynchronních motorů je moment úměrný čtverci napětí.

Aby nedošlo k tomuto kolísání, které nám ovlivňuje spotřebiče, se reguluje právě již zmíněných jalovým výkonem. Tato regulace lze vysvětlit na linearizovaných statických charakteristikách zdrojů a zátěže.



Obrázek 12 Regulace a řízení napětí [9]

Právě na tomto obrázku je znatelně vidět přesun pracovních bodů z původního stabilního bodu 1 do bodu 1' poklesem napětí s důvodem větší spotřeby jalového výkonu. Tento bod 1' je také stabilní, ale napětí regulujeme na jmenovitou hodnotu, proto zvýšíme bilanci jalového výkonu, abychom se soustavou opět dostaly na stejnou stabilní napěťovou hladinu 2, ovšem je pro to nutné zvýšit bilanci jalového výkonu. Takže tímto procesem je dokázáno, jak jalový výkon ovlivňuje napětí.

### 3.3 Prostředky regulace U/Q

Pro regulaci se využívá závislost právě mezi U a Q, a právě této závislosti využíváme k ovlivnění hladiny napětí změnou bilancí jalového výkonu.

Nejčastěji se využívají pro regulaci odbočky transformátorů, čímž se změní rozdělení jalového výkonu a regulujeme napětí. Další častou variantou je změna dodávaného jalového výkonu, která je způsobena změnou buzení generátorů, popřípadě kompenzací za pomoci kompenzačních prostředků, které nám vnášejí do sítě více jalového výkonu jako třeba synchronní kompenzátory nebo popřípadě statické kondenzátory. Další možnost je využití sériového zapojení kondenzátorů, což nám v důsledku sníží úbytky napětí.

### 3.4 Závislost napětí na jalovém výkonu

Na napětí nemá prakticky přenos činných výkonů žádný dopad, ovšem toky jalových výkonů ovlivňují úbytky napětí. Napětí na konci vedení je dáno odebíraným jalovým výkonem. Diferenciální napětí je dáno takto:

$$\Delta U = \frac{dU}{dQ} \cdot \Delta Q = \frac{\Delta Q}{\frac{dQ}{dU}} \quad (8)$$

Zde neplatí označení  $\Delta U$  jako úbytek napětí, ale značí změnu napětí při rozdílu  $\Delta Q$  a pokud nás zajímá napětí na konci, je potřeba k tomu znát napětí na začátku a přenášený jalový výkon  $Q$  a tato rovnice by vypadala takto:

$$U = U_1 - X \cdot \frac{Q}{U} \quad (9)$$

Pokud z této rovnice chceme vypočítat jalový výkon  $Q$ , dostaneme po jeho první derivaci podle napětí tuto rovnici:

$$\frac{dQ}{dU} = \frac{U_1 - 2U}{X} \quad (10)$$

Na levé straně rovnice se nachází jednotka  $\text{kVAr} \cdot \text{kV}^{-1}$  a udává nám velikost změny jalového výkonu při změně napětí o 1 kV. Pochopitelně je tato hodnota nepřímo úměrná reaktanci vedení, pokud reaktanci zvýšíme hodnotu pak bude tato hodnota nižší. Tudíž nám vychází logický závěr, kdy při nízké hodnotě reaktance  $X$  je potřeba dodat větší hodnotu jalového výkonu pro žádanou změnu napětí, než kdyby byla reaktance vyšší. Z toho můžeme vyvodit přibližný, ale využívaný vztah:

$$\frac{dQ}{dU} \cong -\frac{U_1}{X} \quad (11)$$

Podle tohoto vztahu vychází že tato hodnota  $dQ/dU$  je úměrné zkratovému proudu.

### 3.5 Akční členy v pilotním uzlu Krasíkov

Samotný uzel Krasíkov má dvě různé citlivosti v závislosti na jedné proměnné, která je zřejmá. Jedná se o přečerpávací elektrárnu Dlouhé Stráně, kterou u návrhu a modelu pilotního uzlu uvažují pouze jako zapnutou nebo vypnutou. Pokud je přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně (EDS) v provozu, chová se pilotní uzel více tvrdě a jeho citlivost je podle dokumentace 20-30 MVar / 1 kV tudíž se chová

jako tvrdší uzel. Naopak pokud je elektrárna odpojena, citlivost uzlu značně naroste a to na 20 MVar / 3 kV. Musí se tedy do modelu dát teoreticky EDS a možný přepínač pro zapnutí či vypnutí tohoto zdroje a bude tím nejzazší variantou regulačního akčního členu. EDS funguje nejčastěji jako kompenzátor špičkových odběrů v síti. Při špičkovém odběru se EDS zapne a začne do sítě dodávat činný výkon a společně s ním i jalový. Ovšem v době tzv. nočního proudu, kdy elektřina z ekonomického hlediska je nejlevnější, je spuštěna na „čerpací chod“ a začne se čerpat voda do horní nádrže, aby mohla při další možnosti dodávat výkon při špičkovém zatížení sítě.



*Obrázek 13 Elektrárna Dlouhá Stráně [20]*

Dalším důležitým akčním členem v tomto pilotním uzlu je synchronní kompenzátor. Je umístěn v terciáru transformátoru 400/110 kV a dokáže regulovat jak hladinu 400 kV tak i hladinu 110 kV, pochopitelně ne ve stejné velikosti. Pokud se bude jednat o hladinu 400 kV, pak synchronní kompenzátor dokáže díky 50 MVar docílit změny až 1,5 kV a pokud se budeme bavit o síti 110 kV je schopen tentýž synchronní kompenzátor docílit změny až 2 kV. Tyto kompenzátory jsou v pilotním uzlu umístěny dva, které jsou řízeny společností ČEPS a.s. pomocí firmy ČEZ distribuce východ a jejich dispečinku.

Do třetice je v tomto uzlu plánovaná také regulovatelná tlumivka o rozsahu jalových výkonů 60-120 MVar. Jedná se konkrétně o regulovatelnou třífázovou tlumivku od společnosti Siemens. Tato tlumivka je důvodem zadání této diplomové práce, kvůli algoritmu pro její efektivní využití v pilotním uzlu Krasíkov. Tlumivka je navržena přesně na zadání společnosti ČEPS a.s. a má být vyrobena a instalována podle plánu v roce 2021. Podklady k této regulovatelné tlumivce mám k dispozici, a právě to využiji u modelu a návrhu algoritmu pro řízení napětí v pilotním uzlu Krasíkov pro efektivní využití potenciálu regulovatelné tlumivky. Tabulka s hodnotami odboček navrhované výrobcem je dodána v příloze.

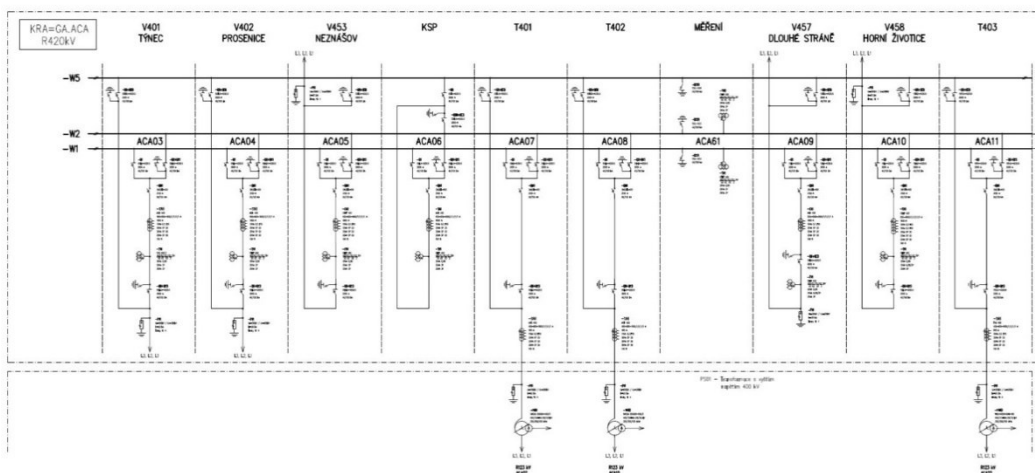




Obrázek 14 Regulovatelná tlumivka [4]

#### 4. Elektrický model uzlu Krasíkov pro účely regulace U/Q v tomto pilotním uzlu

Obecně je tento uzel vnímán jako tzv. pilotní uzel, který nám udržuje hladinu napětí na správné hodnotě. Z důvodu napojení na PS se zde podle mých instrukcí drží napětí na hladině 415 kV z důvodu vyšší stabilizace sítě a okolních uzlů. Jak bylo popsáno již dříve je zde několik větví, které jsou vedeny na Týnec, Prosenice, Neznášov, Horní Životice a poté na elektrárnu EDS. Jsou zde i propojení do distribuční soustavy. Právě na propojení do distribuční soustavy s uzlem Krasíkov je v terciáru transformátoru instalován synchronní kompenzátor. Díky zapojení v terciáru ovlivňuje síť 400 kV tedy PS i distribuční soustavu na napěťové hladině 110 kV. Díky přepínání odboček se dá tento synchronní kompenzátor využívat na obou sítích zároveň, jen se odbočkami řídí a přerozděluje do jednotlivých soustav.

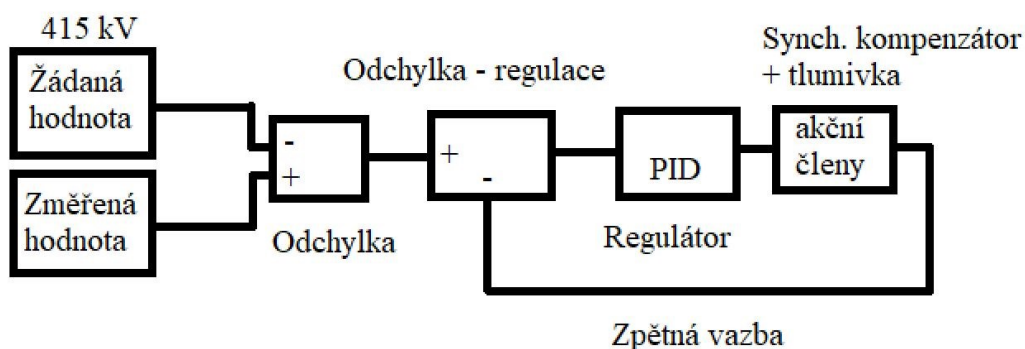


Obrázek 16 Jednopolové schéma elektrické rozvodny Krasíkov [10]

Přiložené schéma je pouze orientační a při odsouhlasení přiložení schématu, bude přiloženo v elektrických přílohách v databázi programu EDISON.

##### 4.1 Elektrický model blokově

Obecně pro návrh algoritmu je nutné si rozložit členy ať už pasivní či aktivní a určit jakým způsobem se bude regulovat a jakým způsobem bude provedena zpětná vazba.



Obrázek 17 Blokové schéma regulace pomocí PID regulátoru a zpětné vazby

Na výše uvedeném blokovém modelu, který je inspirováno běžným schématem využívaným při regulaci PID regulátorem se zpětnou vazbou. Samotný algoritmus bude navržen v SW MATLAB v podprogramu Simulink, kde se navrhne model, který bude simulovat měřenou složku a následně od této „naměřené“ hodnoty napětí odečítat požadovanou hodnotu napětí. Tím dostaneme odchylku, která vstupuje do PID regulátoru a ten podle její velikosti a orientace + nebo – začne akčními členy regulovat toky jalových výkonů. Následně z akčních členů nám vyjde regulovaná veličina, která by měla při součtu od odchylky vyjít složka nulová, a tudíž dosáhnout stavu, kdy změřená složka bude rovna požadované. Samozřejmě protože kompenzátor reguluje spojitě, nenastane okamžité vyregulování odchylky z důvodů zpoždění v logických členech regulace a také v zpoždění, které nám způsobí čas pro roztočení kompenzátoru z důvodů setrvačnosti.

#### 4.2 Sestavení algoritmu

V programu Simulink byl sestaven model uzlu a následně byly vypracovány také regulační členy pomocí bloků, které byly programem Simulink nabízeny. Bohužel některé bloky, které byly potřeba nebyly ve verzi pro výuku povoleny, a proto byla využita improvizací cesta. Například je v placené verzi Simulink transformátor s přepínáním odboček, ale bohužel kvůli absenci tohoto bloku byl vymyšlen systém přepínání odboček transformátoru.

Přepínání odboček je realizováno ručně přes nastavením hodnoty na posuvném vypínači, odkud se hodnota odpovídající číslu odbočky vygeneruje a vstupuje do přepínače, který je nastaven, aby při dané hodnotě odpovídající (1,2,3,4... ,17) přepnul na danou odbočku. Tomuto přepínači jsou předřazeny bloky Gain, které nám násobí signál ze synchronního kompenzátoru určitou konstantou, která odpovídá dané odbočce. Pochopitelně má každá odbočka svůj blok Gain a hodnota, kterou se signál přenásobuje je v intervalu (0,36;0,481). Tato hodnota nám odpovídá, jaká část jalového výkonu z kompenzátoru jde do PS a zbytek jde do soustavy distribuční. Samozřejmě v % se jedná o hodnoty pro PS od 36% až do 48%. Proto i přes to, že kompenzátor dosahuje hodnot +110 MVar, může se do PS dostat pouze lehce přes 48% této hodnoty a sice 52,8 MVar. Lze říci, že přerozdělení výkonu vyplývá z impedančních poměrů mezi jednotlivými vinutími. Ovšem dodávaný jalový výkon, který bude dodán do PS a DS se bude různit, protože kompenzátor ovlivňuje tok jalového výkonu přes transformátor.

Samozřejmě se musí také namodelovat citlivost uzlu v závislosti na stavu EDS, jestli je v provozu a dodává nám jalový výkon, či popřípadě spotřebovává. Veškeré přepočty citlivosti namodelují pomocí bloků Gain, stejně jako u přepínání odboček slouží k přenásobení signálu konstantou. Tedy musím provést výpočet, abych se k těmto konstantám dostal a mohl přepočítávat jalový výkon na napětí díky znalostem citlivosti uzlu Krasíkov. Konstanty označuji v rovnicích jako D.

$$D = \frac{\Delta U}{\Delta Q} \quad (12)$$

Obecně pokud budeme počítat pouze se změnou 30 MVar a 20 MVar v jednotlivých případech citlivosti, bude výpočet jednodušší. Podle mých informací velikost změny toku jalového výkonu 30 MVar při nižší citlivosti ovlivní napětí o 1 kV a při citlivosti vyšší, tedy při vypnuté EDS se změna hodnoty toku

jalového výkonu o 20 MVAR projeví změnou o 3 kV. Díky těmto hodnotám byly získány konstanty odpovídající citlivostem pro přepočet z Q na U a poté po převrácení hodnoty i z U na Q z těchto rovnic:

$$D_{v.c.} = \frac{1}{20} = 0,05 \quad (13)$$

$$D_{n.c.} = \frac{1}{30} = 0,033 \quad (14)$$

Z rovnic vyšly hodnoty pro nižší citlivost 0,033 a pro vyšší 0,05. Tudíž změnu toku jalového výkonu musím vynásobit těmito hodnotami, abych dostal napětí, které nám změní. Tudíž pokud změníme tok jalového výkonu o 30 MVAR, pak se nám napětí při nižší citlivosti změní o 1 kV díky vynásobení hodnotou 0,033 a při vyšší citlivosti se mění hodnota na 0,05, jak bylo výše popsáno.

V modelu bylo navrženo, aby PID regulátoru předával požadavek na změnu toku jalového výkonu, a ne požadavek na změnu napětí, přepočítat opět z hodnoty napětí na hodnotu jalového výkonu. Tyto hodnoty, které vyšly výše popsaným způsobem se pouze dají na mocninu -1 a tudíž se nám dostanou do jmenovatele zlomku a vyjde nám při dané citlivosti konstanta pro přepočet z U na Q. Tyto hodnoty podle výpočtu odpovídají hodnotám při nižší citlivosti 30,3 a při vyšší citlivosti 20.

Samotný kompenzátor představuje PI regulátor, který odpovídá hodnotám, které jsou nastaveny v systému, který reguluje napětí po celou dobu, po kterou je instalován v pilotním uzlu. Jelikož je tento kompenzátor umístěn v terciáru transformátoru 400/110 kV, muselo se nasimulovat nějakým způsobem právě přepínání odboček, které bylo ztížené díky starší verzi SW Simulink. Ve vyšší verzi je přímo nastavitelný transformátor s přepínačem odboček. Bohužel jak je výše popsáno, není k dispozici placená nová verze SW MATLAB a tudíž bylo nutné toto přepínání odboček namodelovat zjednodušenou cestou a tím obejít chybějící „součástku“ do algoritmu.

EDS pochopitelně dodává signál rozdílný od 0 pouze pokud EDS je v provozu, fungující na principu přepínání jako u citlivosti. Signál hodnoty 1 znamená EDS v provozu a naopak -1 znamená EDS mimo provoz.

Až následně sčítám hodnotu přepočtenou na napětí z kompenzátoru a EDS s už přepočtenou hodnotou napětí ovlivněnou tlumivkou a vychází regulační veličina všech tří členů, která zpětnou vazbou jde do součtového členu, před hlavní řídicí PID regulátor.

Původně bylo nutné kvůli zasmyčkování na tuto zpětnou vazbu udělat zpoždění, ale následně bylo pro zahrnutí v algoritmu i časovou prodlevu logických členů předřazeno zpoždění jednotlivým členům v závislosti na jejich logickém členu a prioritizování při velikosti odchylky. Větší odchylka využívá vyšší kapacitu regulátorů a pouze se dolaďuje „slabším“ členem. Při malé odchylce je regulováno na přesnou hodnotu a při větší odchylce se reguluje v mezích jmenovité hodnoty  $\pm 0,5$  kV. Pokud PID regulátor zaznamená, že se reguluje s touto odchylkou zkontroluje kapacity regulačních členů a se zpožděním doreguluje na přesnou hodnotu.

Obecně pro zpřehlednění celého algoritmu jsou popsány jednotlivé vstupy do subsystému a jednotlivé členy generující nebo měnící signál. Do modelu jsou zaneseny i texty pro lepší a rychlejší

orientaci v modelu. Samotný algoritmus je obsažen v zobrazeném modelu a bude následně přiložen jako elektronická příloha v systému EDISON, ve formátu pro SW MATLAB Simulink.

Celý algoritmus byl sestavován postupně a zdokonaloval se krok po kroku, nejdříve byla namodelována měřená hodnota napětí a následně přes PID regulátor do kterého vstupovala už pouze odchylka od jmenovité hodnoty začaly nastavovat hodnoty regulátoru, aby odpovídal rychlostí požadované hodnotě, aby se síť doregulovala do 120 vteřin do odchylky  $\pm 5\%$  požadované hodnoty, což je v tomto případě na žádost konzultantů z ČEPS a.s. 415 kV.

#### Synchronní kompenzátor

Jako první z regulačních členů byl modelován kompenzátor, jako generátor spojitě narůstající signálu, ale po vyzkoušení jsem od této varianty ustoupil, protože jeho regulace probíhala i bez spuštění PID regulátorem a od spuštění simulace rychle najel na omezené maximum a odtud se nehýbal a držel se této hodnoty. Poté bylo konzultováno právě téma namodelování kompenzátoru a bylo doporučeno to vyřešit PI regulátorem, který využívají už v zabudovaném systému. Zpočátku byly modelovány hodnoty náhodně a zkoušela se rychlost regulace podle odchylky. Následně po několika konzultacích a odzkoušení jsme se s konzultanty dohodli, že využijeme už nastavený PI regulátor, tedy hodnoty z něj, aby nebylo nutné tento synchronní kompenzátor znovu modelovat a nastavovat přesně hodnoty, aby odpovídali charakteristikám stroje.

#### Tlumivka

Po zevrubném nastavení hodnoty, která by odpovídala kompenzátoru bylo zjištěno, že je potřeba pro lepší výpočty regulace, aby z řídicího PID regulátoru vycházela hodnota jalového výkonu odpovídající požadovanému jalovému výkonu pro regulaci. Bylo nutné tedy zkorigovat hodnoty, aby počáteční odchylka např. 45 MVar odpovídala i za řídicím PID regulátorem zhruba 45 MVar. Poté bylo nastaveno ovlivňování jednotlivých regulačních členů v závislosti právě na této požadované hodnotě. Kdy při potřebě – 60 MVar se zapne tlumivka na první stupeň a není potřeba vůbec regulovat kompenzátozem, naopak hodnota vyšší než -60 MVar vypíná regulaci tlumivkou, protože se doreguluje kompenzátozem.

Po delším sestavování a zkoušení různých variant byla nastavena hodnota požadovaného jalového výkonu pro zapojení tlumivky na -60 MVar, ale s podmínkou, že kompenzátor se blíží svému maximu regulačního výkonu směrem dolů. Samotná tlumivka má předřazen PI regulátor pro zpomalení reakce tlumivky zároveň se zpožděním 9 vteřin. Pokud je tlumivka zapojena a požadovaná hodnota jalového výkonu dosáhne odchylky 40 MVar nebo vyšší, tlumivka se automaticky odpojí a doreguluje se kompenzátozem. Tlumivka je navržena, aby odpovídala realitě a každý skok na jiný stupeň trvá minimálně 8 vteřin, aby nepřeskakovala pořád o stupeň nahoru nebo dolů, protože má omezený počet přepnutí odboček na svou životnost.

#### Elektrárna Dlouhé Stráně a extrém

Byla podrobně namodelována, jak je výše popsáno PI regulátorem stejně jako kompenzátor a do něj byly dosazeny také hodnoty z algoritmu, který ČEPS a.s. již využívá. Samotný stav EDS ovlivňuje

kromě spínání regulačního členu, který sama elektrárna představuje, také jak je výše popsáno citlivost uzlu, z něhož je pokaždé proveden důsledný přepočít z  $Q$  na  $U$ , popřípadě obráceně. Díky nižší citlivosti při zapnuté přečerpávací elektrárně Dlouhé Stráně, není při většině případů, ani regulovatelnou tlumivku důvod zapínat. Samotné odchylky se nižší citlivostí zmenší, a tudíž se sníží i potřebný jalový výkon pro regulaci odchylky. Oproti synchronnímu kompenzátoru reguluje ve větším rozsahu v obou směrech toku jalového výkonu.

Při simulování je možné během simulace zapnout nebo vypnout EDS a tím při regulaci ovlivňovat odchylky a regulaci, která je potřeba. Z důvodů nemožnosti takového rychlého přepínání EDS při regulaci odchylky s touto možností dále nepracuji. Tato možnost přepínání během spuštěné simulace by byla blízka realitě, ale hardware nebyl schopen tyto výpočty vypočítat v rozumném časovém horizontu.

Při zapnuté přečerpávací EDS mám nejen přepínání citlivosti, ale také v algoritmu ovlivňuje podmínku zapojení tlumivky, kdy tlumivka spíná při požadovaném jalovém výkonu -135 MVar. Tato hodnota odpovídá téměř vyčerpání regulačních kapacit EDS i synchronního kompenzátoru. Celkový tok jalového výkonu, který je možné teoreticky dosáhnout při kombinaci zapnutí všech regulačních prvků odpovídá hodnotě přes -280 MVar, což odpovídá při snížené citlivosti hodnotě -14,3 kV v pilotním uzlu, pokud by všechny regulační akční členy spotřebovávali jalový výkon. Ovšem, protože je synchronní kompenzátor zapojen v terciáru tak této hodnoty dosáhnout v praxi nelze.

Naopak lze také kombinací synchronního kompenzátoru a EDS docílit jalového výkonu o hodnotě 255 MVar, ale opět pouze teoreticky, protože musíme opět zohlednit kompenzátor zapojený v terciáru a tudíž reguluje i distribuční soustavu 110 kV a tudíž se regulace nedostane v plné míře pouze do PS, ale část ji míří do DS.

## 5. Návrh algoritmu koordinace jednotlivých členů

Elektrický model je sestaven v programu MATLAB v podprogramu Simulink, kde bude z výsledného modelu bude znatelný algoritmus pro využití koordinace napětí v pilotním uzlu Krasíkov.

### 5.1 Odchylka napětí

Muselo se poněkud vyimprovizovat zdroj, který by v algoritmu dělal odchylky toků jalových výkonů, nejdříve bylo zkoušeno využít generátor náhodných čísel, ale ten se ve výsledném modelu neosvědčil a negeneroval dostatečnou velikost odchylky. Využil se tedy jednoduchý zdroj skokový, do kterého byly zadány hodnoty, mezi kterými bude v dané odchylce přepínat. Mezi jednotlivými skoky byl určen čas 120 sekund jako čas, kdy by se měla odchylka vyregulovat za pomoci kompenzátoru, EDS nebo využitím regulovatelné tlumivky. Tuto odchylku bylo zapotřebí pomoci přepínače citlivosti uzlu přepočíst na napětí podle toho, jestli je EDS v provozu nebo není.

#### Citlivost uzlu

Pochopitelně je nastavena vyšší citlivost, pokud EDS v provozu není a sice na hodnotu 0,1 a tedy pokud se změní tok jalového výkonu o hodnotu 20 MVar nahoru nebo dolů pak se změní napětí o 1 kV. A pokud je EDS v provozu pak změna 30 MVar způsobí změnu pouze 1 kV a přepočítávám hodnotou 0,033, což znamená, že uzel je logicky tvrdší. Tato hodnota se zadává do bloku Gain, který funguje na principu, že vstupní signál vynásobí hodnotou, kterou jsme do jednotlivé bloku nastavili, což jsou výše vypsané hodnoty 0,033 a 0,05, což nám vynásobí signál těmito hodnotami a získáme tak hodnotu napětí, ovlivněnou touto hodnotou jalového výkonu Q. Tento přepínač je realizován přes ručně ovládaný přepínač, který nám EDS přepíná mezi zapnuto a vypnuto a tento povel ovlivňuje veškeré citlivostní přepočty z Q na U a obráceně ať se jedná o citlivost zdroje odchylky nebo i zdroje regulační.

Výpočet citlivosti je využíván při „vytváření“ odchylky, kdy zdroj této odchylky nám generuje popřípadě spotřebovává jalový výkon, který se po přepočtu citlivosti na U dostává do součtového členu, kde vznikne požadované napětí i s touto přepočtenou odchylkou a po opětovném odečtení žádaného napětí a následném odečtení regulační odchylky se opět přepočítává pomocí citlivosti zpět na jalový výkon, který vstupuje jako požadavek pro řídicí PI regulátor, který již pracuje s tokem jalových výkonů a nikoliv s napětím.

#### Modelování odchylky

Samotnou odchylku byla modelována, jak je výše zmíněno jako skokový zdroj, který nám co 120 sekund změní hodnotu na nastavenou a po přepočtu citlivosti z Q na U se rozdíl napětí přičte k požadované hodnotě v pilotním uzlu. Po konzultaci zadané hodnoty napětí s konzultanty z firmy ČEPS a.s. jsme určili, že se nejedná o hodnotu 400 kV, ale o hodnotu vyšší a sice 415 kV. Toto napětí plus přičtená odchylka vyjadřují naměřenou hodnotu napětí v uzlu.

### 5.2 Vstup PI regulátoru

Nasimulovaná měřená veličina je popsána výše a od této hodnoty se opět odečte hodnota jmenovitého požadovaného napětí a vyjde nám konečná odchylka napětí, od které se odečte i

regulovaná velikost napětí. Z tohoto součtového členu nám vychází hodnota v napětí, a proto ji opět přepočítám na jalový výkon, abych mohl jemněji řídit napětí. Opět je přepočet podle citlivosti a hodnoty 0,05 a 0,033 se změní na hodnoty 20 a 30,3, což nám bude fungovat obráceně, protože určujeme, kolik jalového výkonu v MVar ovlivní jeden kilovolt. Tato hodnota vstupuje do PI regulátoru, který je předřazen všem regulačním členům a řídí nám tedy skupinu regulátorů.

Samotný PI regulátor je nastaven na co nejrychlejší vyrovnaní napětí na požadovanou hodnotu s přihlédnutím na velikost překmitu způsobeného necitlivostí regulace, která je ovlivněna uměle vytvořeným zpožděním, aby nedocházelo k zasmyčkování modelu, což by způsobilo, že by se regulační členy začali regulovat navzájem a při případné odchylce z jiného zdroje by nebyli dostatečné kapacity pro regulaci.

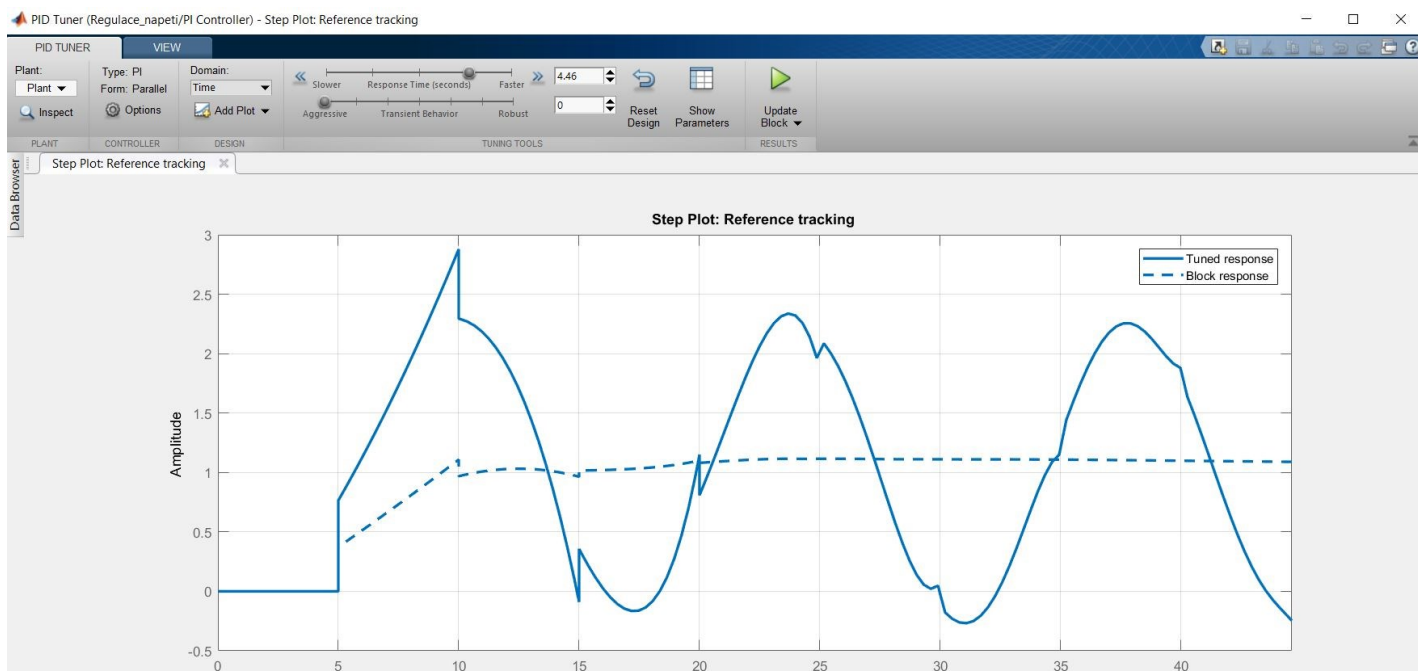
#### Hodnoty PI

Hodnoty regulátoru jsou nastaveny na určené hodnoty uvedené v tabulce:

Tabulka 2. Hodnoty PID regulátoru

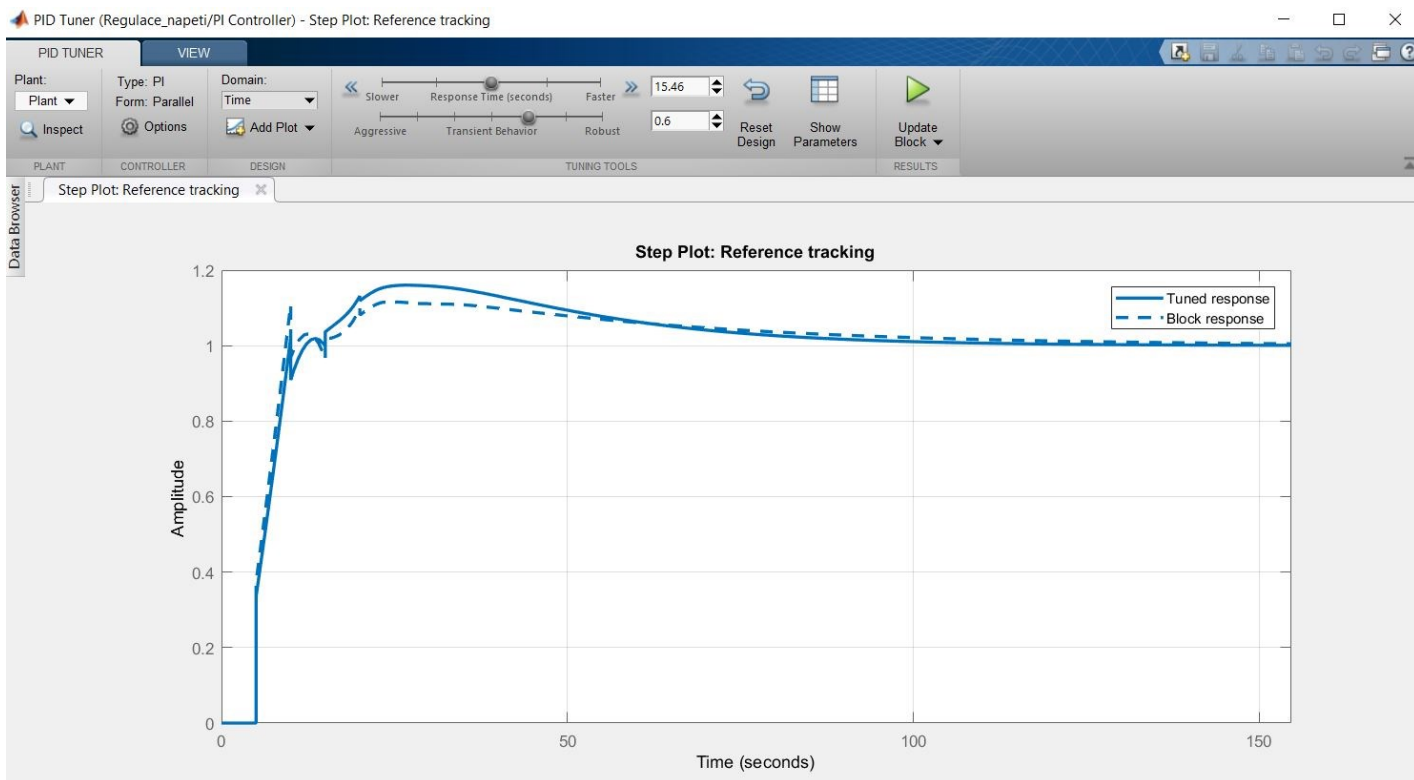
Nastavená část regulátoru	Hodnota určená jednotlivému členu
P	1
I	0,0215

Tyto hodnoty byly nastaveny pomocí funkce Tune, kterou SW Simulink poskytuje a ukazuje nám jednotlivé varianty, jak lze regulátor nastavit se dvěma posuvnými ovladači z nichž jeden ovlivňuje rychlost reakce a druhý jakým způsobem k regulaci dojde, jestli se jedná o tzv. robustní nebo agresivní metodu. Pokud se zvolí agresivní, pak bude veličina kmitat v krátkém intervalu s velkou, ale snižující se amplitudou, naopak maximálně robustní způsobí maximálně jeden překmit, který je závislý na rychlosti PI regulátoru s čímž je v nepřímé úměře. Tudíž rychlejší regulátor, větší překmit.



Obrázek 18 Agresivní nastavení PI regulátoru ve funkci TUNE, čárkovaná je momentálně nastavenou hodnotu PI regulátoru a plná je nastavovaná





Obrázek 19 Robustní nastavení PI regulátoru ve funkci TUNE, čárkovaná je momentálně nastavenou hodnotu PI regulátoru a plná je nastavovaná

### 5.3 Regulační členy

Samotné regulační členy jsou pro větší přehlednost „uschovány“ do tzv. Subsystemu, který umožňuje složitější modely jednotlivých regulačních členů vložit do schématu jako jeden blok, do kterého nám vstupuje odchylka ovlivněná předřazeným PI regulátorem společně se signálem o zapnutém či vypnutém stavu EDS, která nám ovlivňuje citlivost uzlu a tudíž musí regulační členy regulovat více z důvodů snížené citlivosti EDS, ovšem díky tomu, že EDS bude v provozu umožňuje nám její kapacity využít pro regulaci. Kromě regulačního členu EDS, který může být vypnutý je zde i synchronní kompenzátor a regulovatelná tlumivka, jejichž „kroky“ jsou nastaveny po 2 MVar.

Jednotlivé členy jsou zastoupeny různě podle jejich schopností, jestli regulují spojitě, anebo naopak diskrétně a tedy skokově. Jednotlivé podrobnosti ke každému regulačnímu členu budou popsány níže.

#### Synchronní kompenzátor

Synchronní kompenzátor byl namodelován pomocí PI regulátoru, který je omezen výstupem na předem určené hodnotě, která byla dohodnuta s konzultanty ze společnosti ČEPS a.s., která je zadavatelem této práce. Kompenzátor má omezený výstup spodní hranicí na -56 MVar a horní hranici 110 MVar. Tento PI regulátor je taktéž nastaven pro rychlou regulaci s maximálně jedním překmitem,

který nebude tak velký, aby nám spustil regulaci pomocí jiných regulačních členů, ale přesto dostatečně rychlý, než aby došlo k reakci ochranných systémů. Synchronní kompenzátor je umístěn v elektrické stanici v terciáru transformátoru 400/110 kV a tudíž je ovlivněn i odbočkami transformátoru, které jsem byl nucen z důvodů starší verze MATLABu a sice R2017a vytvořit jako přepínač jednotlivých konstant, které odpovídají velikosti dodávané energie do PS.

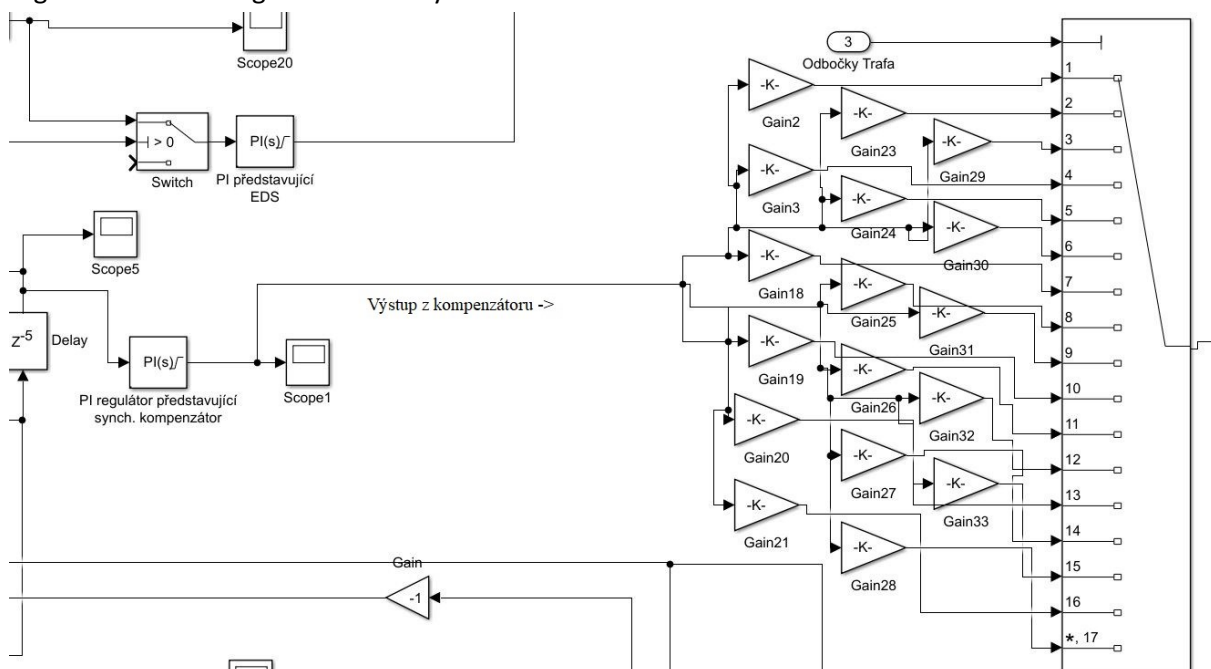
Hodnoty PI regulátoru byl nastaven ručně a sice takto:

Tabulka 3. Hodnoty PI regulátoru, představující synchronní kompenzátor

Nastavená část regulátoru	Hodnota určena jednotlivému členu
P	1
I	0,3

Tyto odbočky je možné přepínat pomocí posuvného přepínače, který je mimo tento Subsystem a má vedle sebe i ukazatel, který nám číselně udává, která odbočka je momentálně využita a vysílá nám do přepínače signál o velikosti dané odbočky a přes nastavenou konstantu opět jako citlivost přes blok Gain, který nám mění hodnotu signálu vynásobením určenou hodnotou.

Takto upravená hodnota pokračuje do součtového členu, kde je sčítána s regulovaným jalovým výkonem členem EDS, pokud je v provozu. Pokud v provozu není pak hodnota z EDS je rovna 0 a dále pokračuje pouze regulovaný signál ze synchronního kompenzátoru přepočteného podle odbočky. Následně opět přes citlivostní člen podle EDS se přepočte tento signál opět z jalového výkonu Q na regulované napětí U. Nakonec, než vystoupí tato hodnota ze subsystému, je přičtena také hodnota z regulačního členu regulační tlumivky.



Obrázek 20 Synchronní kompenzátor s přepínačem odboček a funkcí Gain, podle nastavené odbočky na transformátoru do DS

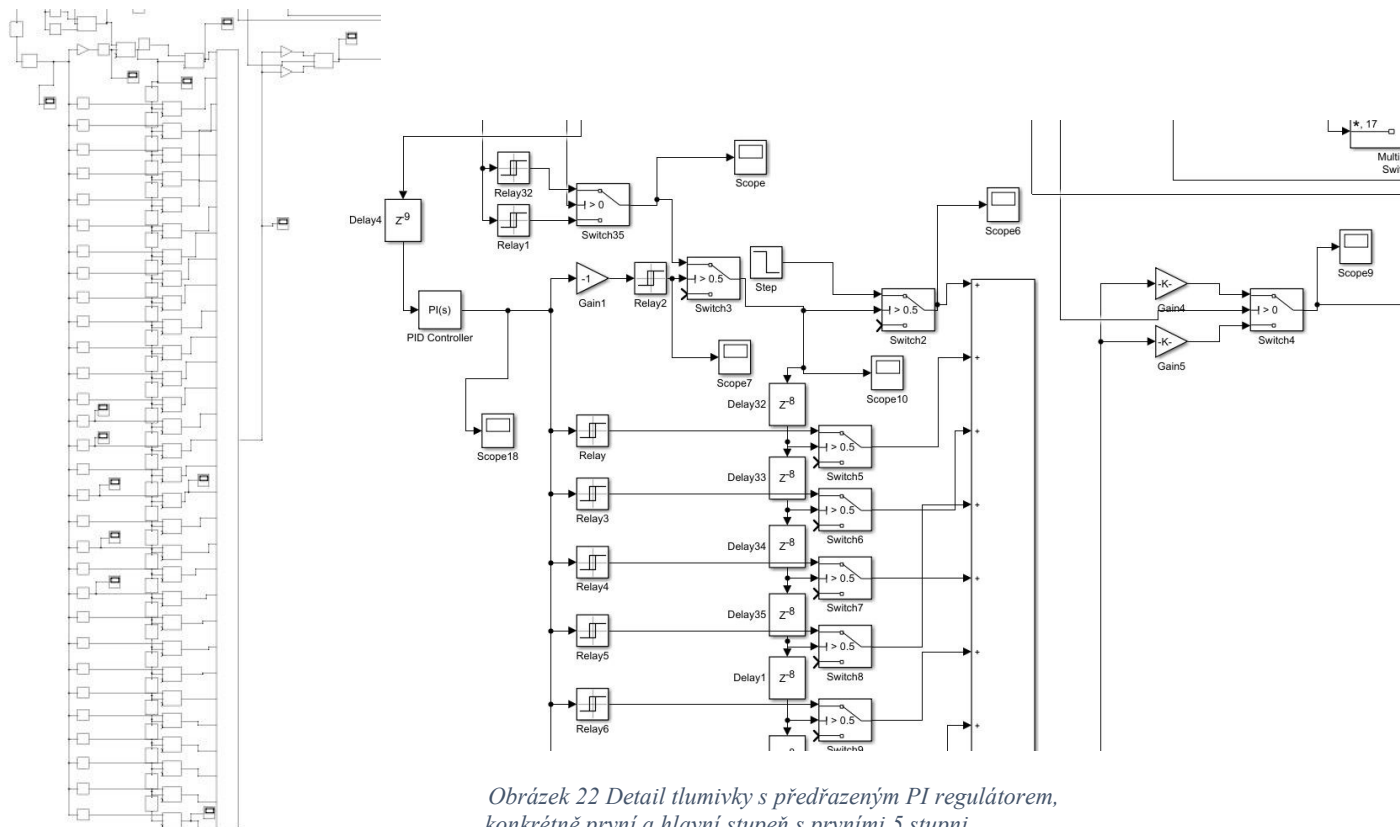
## Regulovatelná tlumivka

Nejdříve byla modelována tlumivka jako skokový zdroj, který se zapojí do obvodu, pokud je požadovaný jalový výkon nižší než -59 MVar. Po modelování větších odchylek se tato varianta neoplatila a špatně se zohledňoval výstupní jalový výkon z kompenzátoru a stávalo se, že tlumivka sepla a kompenzátor se snažil „tlačit“ jalový výkon na druhou stranu a tím se síť sama rozkmitala a tlumivka běžela zbytečně. Dále jednotlivé stupně tlumivky jsou modelovány zvlášť, protože nebyl nalezen efektivní způsob, jak třeba využívat pouze variabilní Gain, který by naznačoval spínání jednotlivých stupňů tlumivky. Byl problém jak s požadovanou hodnotou 8 vteřin mezi přepínanými stupni, ale i ve variabilitě bloku Gain. Bylo důležité udělat obrovské schéma, kdy každý stupeň tlumivky byl další odbočkou, která běžela nezávisle na simulaci a jen se přes spínače pouštěla do obvodu.

Poté se objevila varianta s využitím bloku Relay, který jak už název naznačuje funguje na principu klasického relé. Jakmile signál dosáhne zadané hodnoty, Relé se spustí a pokud signál dosáhne hodnoty vyšší v tomto případě, pak vypne a nebude dále tento stupeň fungovat minimálně po dobu 8 vteřin s tím, že pokud není do obvodu zapojen předcházející stupeň, nemůže stupeň vyšší být sepnut. Zjednodušeně řečeno, pokud je tlumivka zapojena na např. 5. stupni, nemůže po tomto sepnutí sepnout stupeň 7. zároveň s 6. stupněm, ale nejdříve po 8 vteřinách po sepnutí 5. stupně, může sepnout stupeň 6. a po dalších 8 vteřinách až stupeň 7. Každý stupeň má tedy podmíněné zapojení stupně předchozího.

Odpínání tlumivky je okamžité bez závislosti na sepnutém stupni, se celá tlumivka od obvodu odpojí, pokud není její regulační výkon potřeba nebo pokud nedosahuje tak velké odchylky, aby se tlumivka znovu zapnula.

Samotné stupně bylo nutno opět udělat každý zvlášť, což je sice časově náročnější, jak na výpočet simulace, tak i na namodelování tlumivky, ale jedná se o přesnější a jednodušší ve smyslu více jednoduchých výpočtů než jeden, který bude proměnlivý díky závislosti na požadovaném regulačním signálu. Každý jednotlivý stupeň je podmíněn nejen předchozím zapnutým stupněm, ale i samotnou odchylkou, která také musí splňovat předpoklady pro jeho sepnutí a sice velikost využívaného výkonu kompenzátoru, popřípadě EDS. Kdy je hlídáno právě, aby se kompenzátor s EDS „nepřetahovali“ proti tlumivce. Vyřešilo se to tím, že jednotlivá relé jsou podmíněny jak požadovanou odchylkou, tak i výstupem kompenzátoru s EDS a pochopitelně i s předchozím stupněm.



Obrázek 22 Detail tlumivky s předřazeným PI regulátorem, konkrétně první a hlavní stupeň s prvními 5 stupni

Obrázek 21 Tlumivka se všemi stupni

Schéma vypadá složitě, ale funguje na jednoduchém principu, kdy je snaha udělat vše základními členy, které dohromady fungují jako bloky, které sice k dispozici v knihovně Simulinku mám, ale účelem bylo ukázat, jak přesně tyto bloky fungují díky jednoduchým funkcím a výpočtům.

## EDS

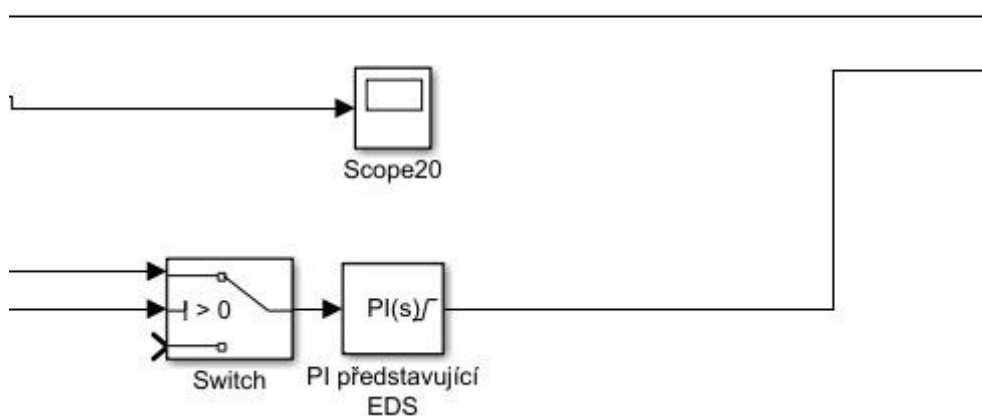
Samotná Elektrárna Dlouhé Stráně byla namodelována jako PI regulátor o hodnotách, které byly s konzultanty dohodnuty a sice:

Tabulka 4. Hodnoty PI regulátoru, představující EDS

Nastavená část regulátoru	Hodnota určena jednotlivému členu
P	1
I	0,1

Na rozdíl od stejně modelovaného synchronního kompenzátoru je EDS zapojena přímo do PS a proto není nutné ji přes hodnotu Gain jakkoliv upravovat a tudíž celým svým rozsahem může regulovat. Před přepočten hodnoty EDS na napětí se sečte se synchronním kompenzátozem, abych mohl při zapnutí EDS hlídat společnou hodnotu těchto dvou členů a zohledňovat tím zapínání tlumivky. Samotný člen je ovlivněn stejně jako nastavení citlivosti na manuálním zapnutí, popřípadě vypnutí Elektrárny Dlouhé Stráně. Pokud je hodnota 1, EDS je v provozu a signál je přiváděn na PI regulátor představující EDS, pokud je hodnota tohoto řídicího signálu -1, pak EDS v provozu není, a

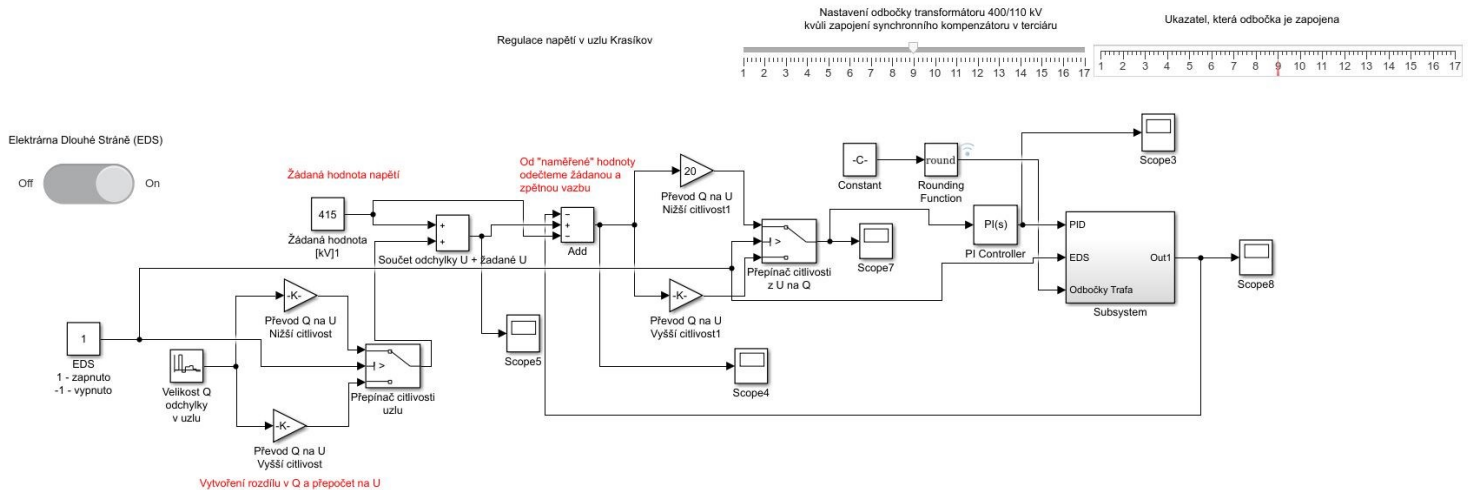
proto není do regulátoru signál vůbec vpuštěn a kvůli chybám při simulaci není z regulátoru ani výstupní signál zapojen do obvodu. Vyšlo najevo zjištění, že pokud není do regulátoru dodán signál, občas si regulátor vytváří vlastní šum, který pak reguluje a ovlivňuje výsledky regulace, proto pokud EDS v provozu není, pak signál z PI regulátoru představující právě EDS není dodáván do regulačního obvodu.



Obrázek 23 PI regulátor, představující EDS s předřazeným přepínačem

## 6. Simulační ověření regulace akčních členů v uzlu Krasíkov

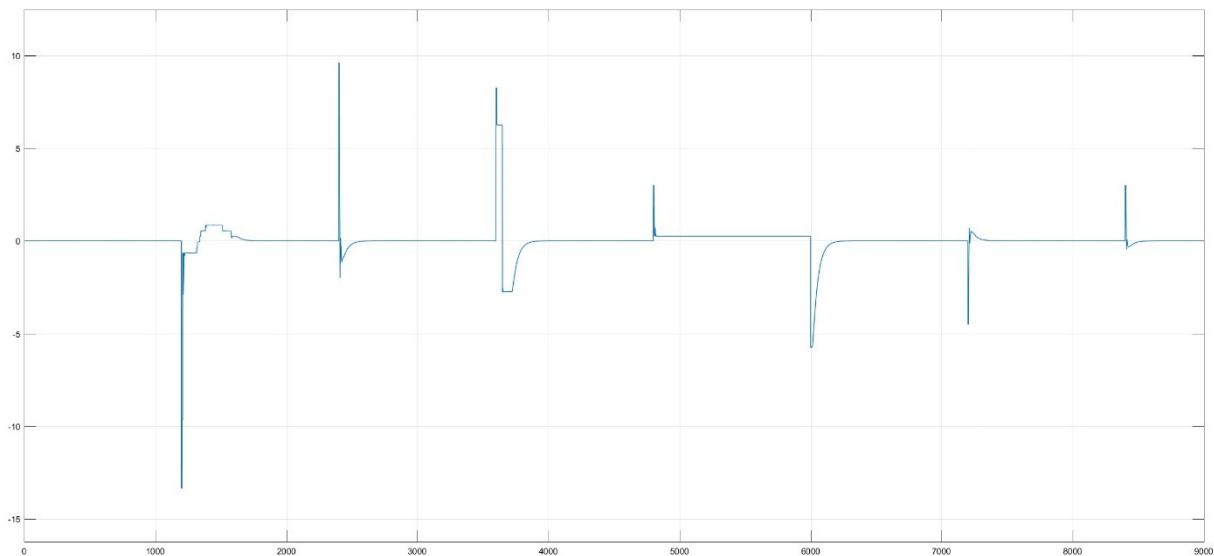
Účelem je vytvořit funkční algoritmus, který bude efektivně ovládat a využívat kapacity regulovatelné tlumivky v kombinaci se synchronním kompenzátorem, popřípadě i s EDS, pokud je v provozu. Tento algoritmus je přiložen v elektronické příloze a je odzkoušen i na krajní případy, kdy je tlumivka využita na maximum, naopak i případ kdy je na maximum sepnut pouze synchronní kompenzátor nebo kompenzátor v kombinaci s EDS. Tento algoritmus nebo spíše jeho obrázek lze vidět níže.



Obrázek 24 Princip algoritmu, včetně modelování „měřené“ hodnoty a přepočtů z  $Q$  na  $U$  a obráceně, včetně zobrazení připojení zpětné vazby z regulačních akčních členů

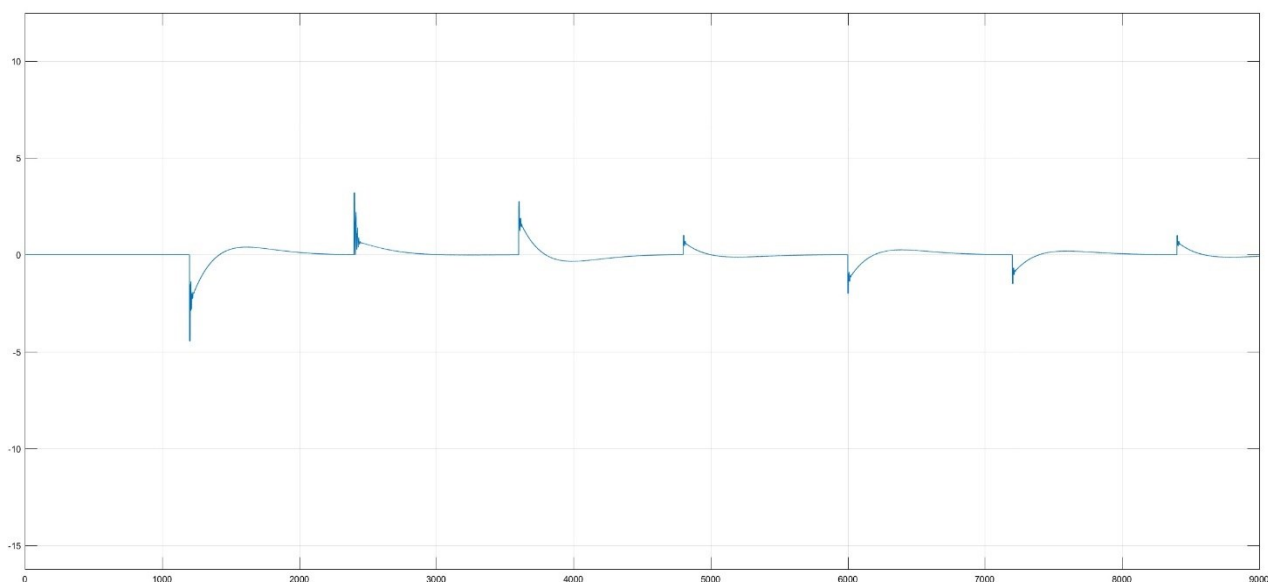
Kromě krajních případů, kdy byla kontrolována především rychlost a schopnosti regulace, byly také odzkoušeny pochopitelně běžné jevy, a tedy následné střídání přebytku jalových výkonů s nedostatkem a obráceně. Tyto změny se střídají v mém případě odzkoušení spojitě, pro lepší přehlednost regulace a lepší orientaci v průbězích, kdy je vidět časová mezera, kdy se nereguluje z důvodů prostoj logických členů v algoritmu, které byly namodelovány se zpožděním, které je raději lehce předdimenzované a soustava i přes tohle předdimenzování reguluje v daných normách a tedy, že do 120 vteřin, musí být podle konzultantů odchylka menší než 2 kV. Občas dochází k překmitu, který tuto odchylku překoná i na druhou stranu, než je původní přechodný děj způsobený bilancí jalových výkonů. Ovšem, díky tomu, že prošel spojitě přes žádanou hodnotu, systém tuto odchylku vyhodnotí jako nový přechodný jev a znovu algoritmus získává nových 120 vteřin, na doregulování této odchylky což už je s velkou rezervou splněno.

Pochopitelně pro kompletní odzkoušení všech reálných možností nebylo dostatek času, a tak bylo namodelováno několik po sobě jdoucích odchylek jak ve stavu vyšší citlivosti a bez přispění EDS, pak i ve stavu citlivosti nižší s přispěním regulace EDS. Téměř všechny ukázky regulace až na jednu výjimku jsou provedeny ve srovnání bez EDS s ovlivněnou citlivostí i s EDS s tvrdším uzlem neboli citlivostí nižší, kdy jsou odchylky napětí, způsobené stejnou velikostí bilance jalových výkonů, podstatně menší.



*Obrázek 25 Celkový průběh napětí v tomto uzlu, při střídání různých proměnných bilance jalového výkonu a jejich doregulování bez přispění EDS.*

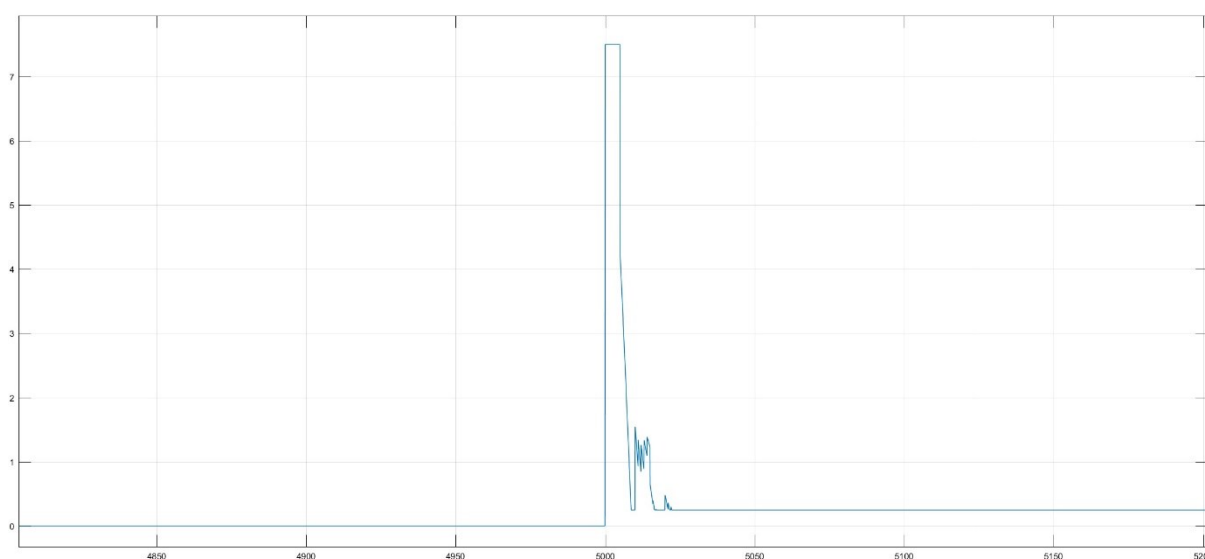
Ve výše uvedeném průběhu napětí je vidět na y-ové ose velikost požadavku pro dosažení požadovaného napětí 415 kV. Tento průběh je nasimulován při vyšší citlivosti, tedy bez přispění regulačního členu Elektrárny Dlouhé Stráně. U třetí změny je vidět diskrétní změnu napětí, způsobenou vypnutím tlumivky se zpožděním, z důvodů logických členů. Všechny tyto změny byly ustáleny do 2 minut, podle požadavků ze strany ČEPS a.s. Překmitý nejsou žádané, ale zde se objevují z důvodu rychlé reakce akčních členů i řídicího PI regulátoru, kdy je nastaven na co nejrychlejší doregulování s ohledem na maximální možný překmit. Překmit se může podle požadavku objevit ideálně pouze jednou u změny bilance jalových výkonů, pokud se nejedná o větší změnu, která se bude řídicí jednotka snažit doregulovat rychleji než odchylku menší.



*Obrázek 26 Stejný průběh změny jalových výkonů, ale při nižší citlivosti, kdy nemusí zasahovat tlumivka, protože ji EDS schopně zastoupí v tomto případě, znatelně spjitější doregulování*

Tento průběh má stejné změny bilance toků jalových výkonů, pouze je zde zapojen i regulační člen EDS, a tudíž odchylky napětí jsou menší a s přispěním EDS jsou doregulovány podstatně rychleji.

Problém u regulace s EDS je ten, že díky velkým kapacitám je tento člen při menších odchylkách hůře „ovladatelný“ a občas se při menší změně jalového výkonu objeví kmitání ze strany synchronního kompenzátoru, který vnímá regulaci EDS jako příliš rychlou a začne se snažit ji zpomalit regulováním proti EDS a tím doregulování zpřesnit, ale EDS to bude vnímat jako nutné navýšení regulačního výkonu a budou se tedy tyto dva členy mírně přetahovat, ale pouze po krátkou dobu, než se řídící PI regulátor, na základě těchto periodických změn rozhodne pro zmírnění kmitání a postupné doregulování do požadované hodnoty. Samotný řídící PI regulátor dostatečně řídí požadavky v uzlu Krasíkov. Samotný řídící PI regulátor se bude ještě v praxi jemně doladovat, ale nejedná se o velké změny.

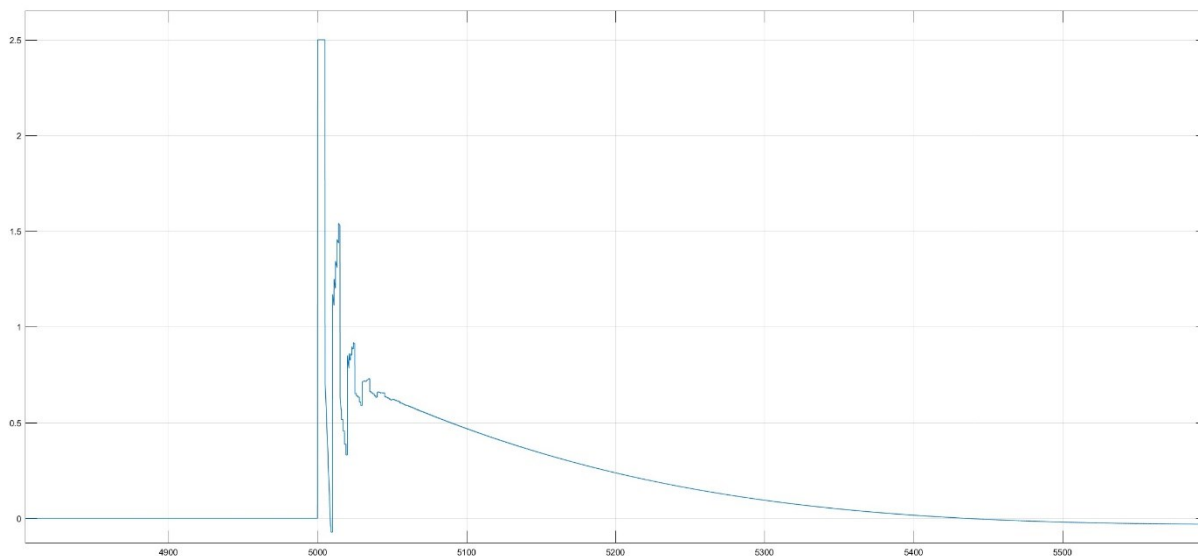


Obrázek 27 Požadovaný jalový výkon +50 MVar, není pouze kompenzátorem dosažitelný, kvůli umístění v terciáru transf.

Zde na Obrázku 27 je vidět nedoregulování z důvodů nedostatečného regulačního výkonu synchronního kompenzátoru. Požadavek je splněn z 96%, což je vypočteno z odchylky způsobené změnou jalového výkonu, díky zapojení kompenzátoru v terciáru nelze využít jeho maximální výkon, ale pouze něco málo přes 48% jeho výkonu pro regulaci PS, což je vysvětleno výše. Zbytek jeho regulačního výkonu přechází do distribuční soustavy. Přesto je doregulováno do odchylky 200 V, která je v mrtvém pásmu řídícího PI regulátoru, a proto nechává tuto nedoregulovanou hodnotu jako žádanou.

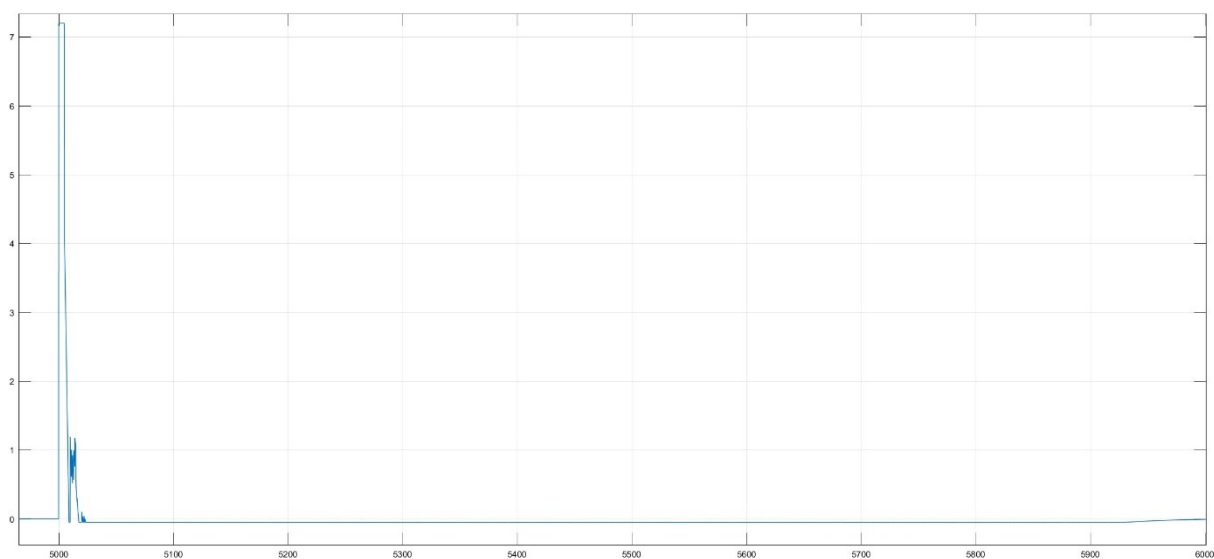
Následující graf je se stejnou požadovanou změnou jalového výkonu +50 MVar, ale při nižší citlivosti a s přispěním EDS. Opět dochází k mírnému kmitání i drobnému překmitu, který byl „spouštěčem“ právě onoho kmitání, ovšem i v tomto případě bylo doregulování do požadované odchylky do 2 minut.





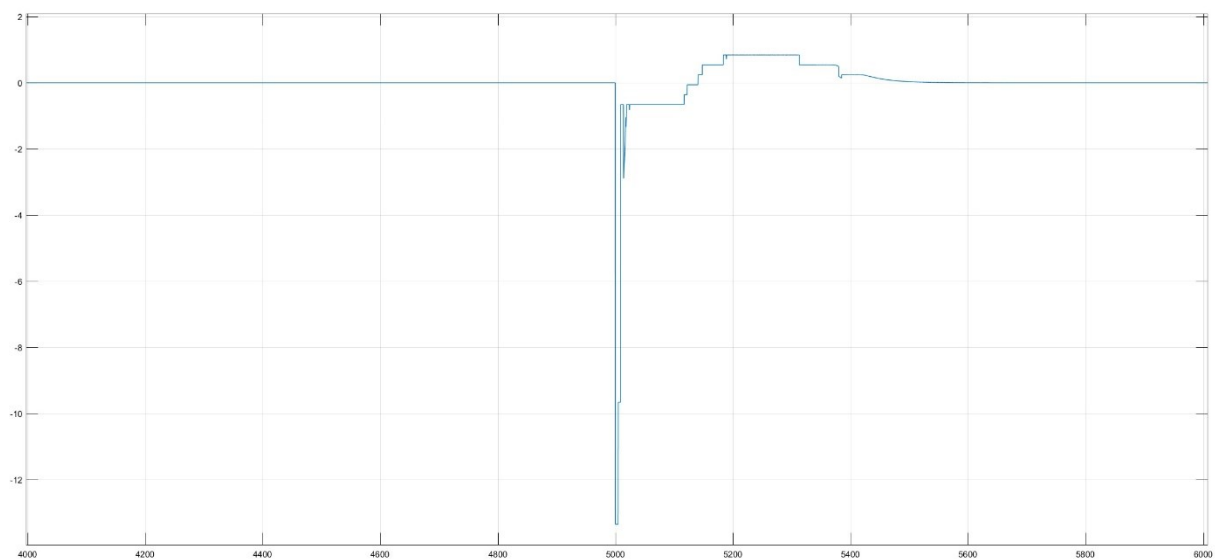
Obrázek 28 Požadavek na +50 MVar, není pro kombinaci EDS a kompenzátoru, velký problém, i přes drobné kmitání

Pokud se jedná o odchylku jalového výkonu zvládnutelnou pouze kompenzátořem, pak odpovídá hodnotě +48 MVar a průběh takovéto simulace je doregulován podle simulace o necelých 52 V nižší, což je zanedbatelná hodnota, ale i ta je po delší době doregulována na nulu.

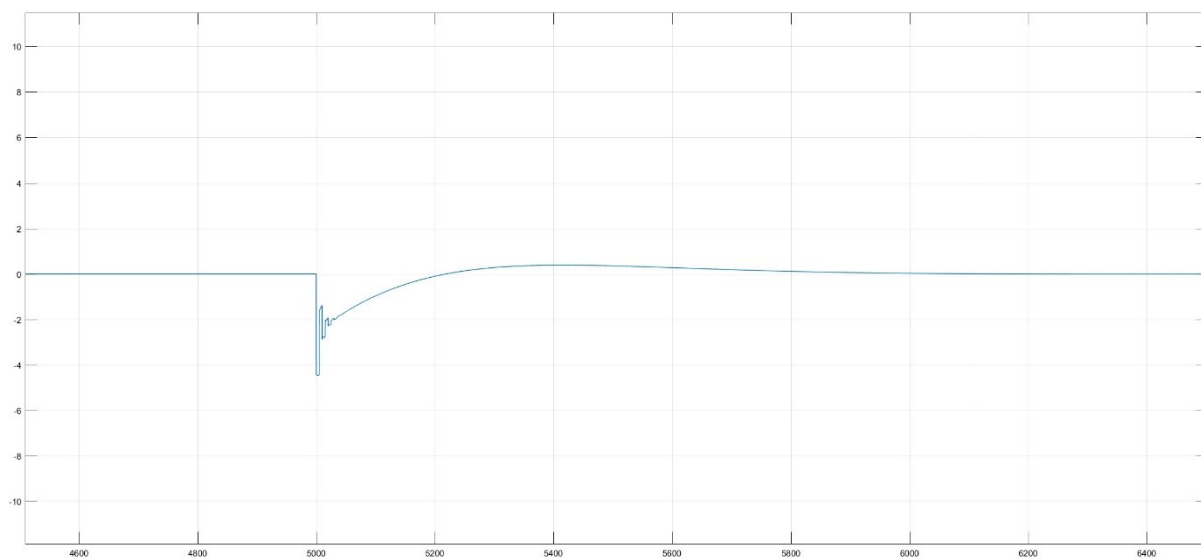


Obrázek 29 Požadavek na +48 MVar je pro synchronní kompenzátor samotný téměř ideální hodnota jeho maxima

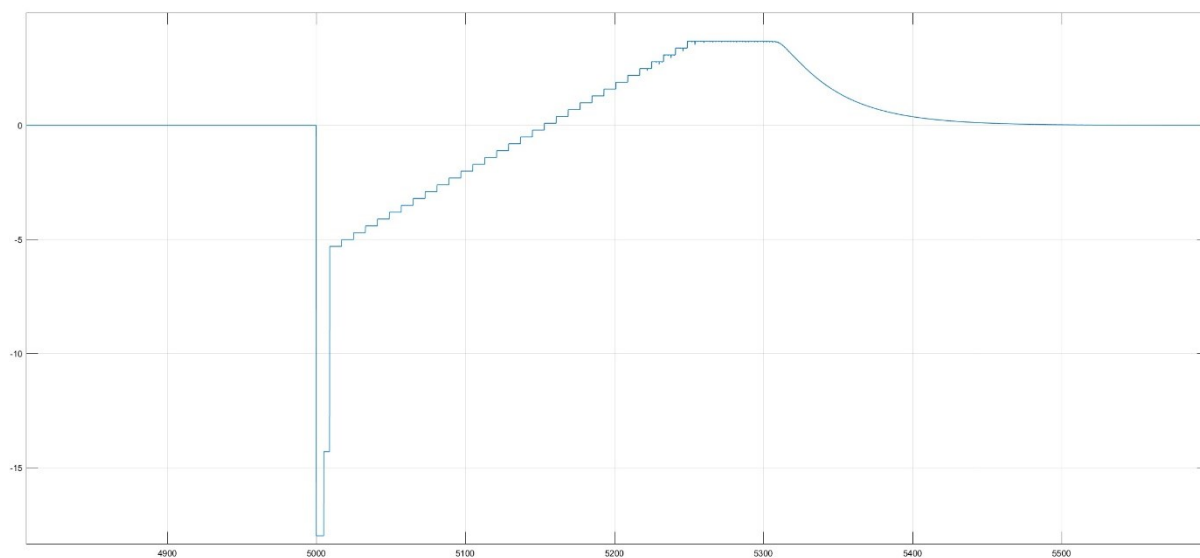
Následují průběhy, které jsou zobrazeny vždy bez EDS a s přispěním regulace z EDS. První budou zobrazeny dva požadavky na -89 MVar a -120 MVar, oba ve variantě s/bez EDS. Následovat bude i poslední průběh požadavku na krajní hodnotu +180 MVar, která je daná maximálním přispěním EDS a synchronního kompenzátoru, stále ještě s drobnou rezervou.



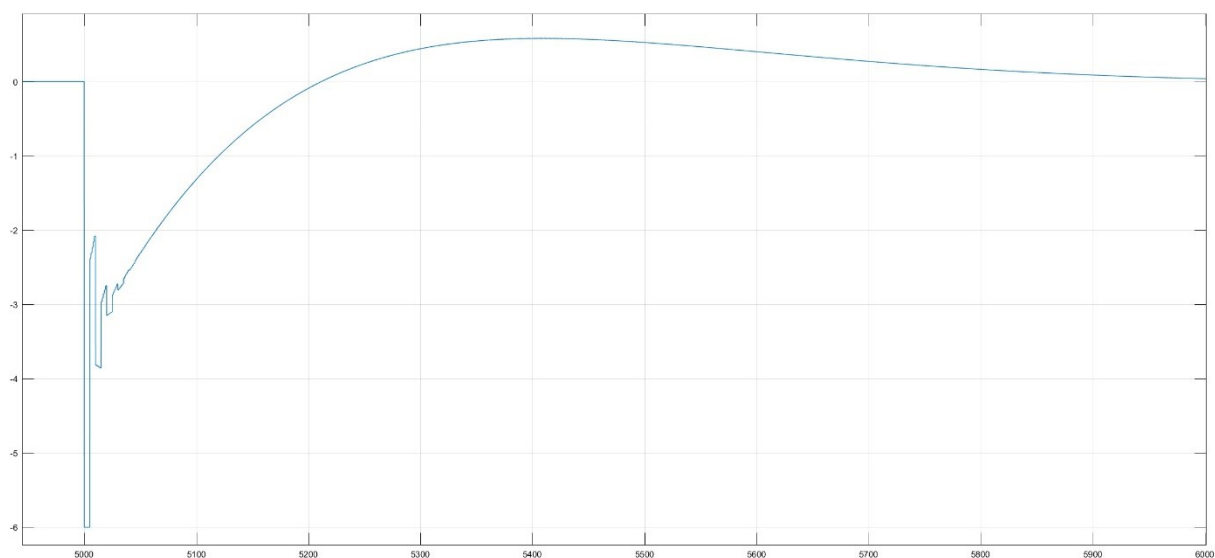
Obrázek 30 Požadavek -89 MVar, kompenzované pouze tlumivkou s kompenzátořem, kde jsou vidět typické diskřétní skoky typické pro tlumivku



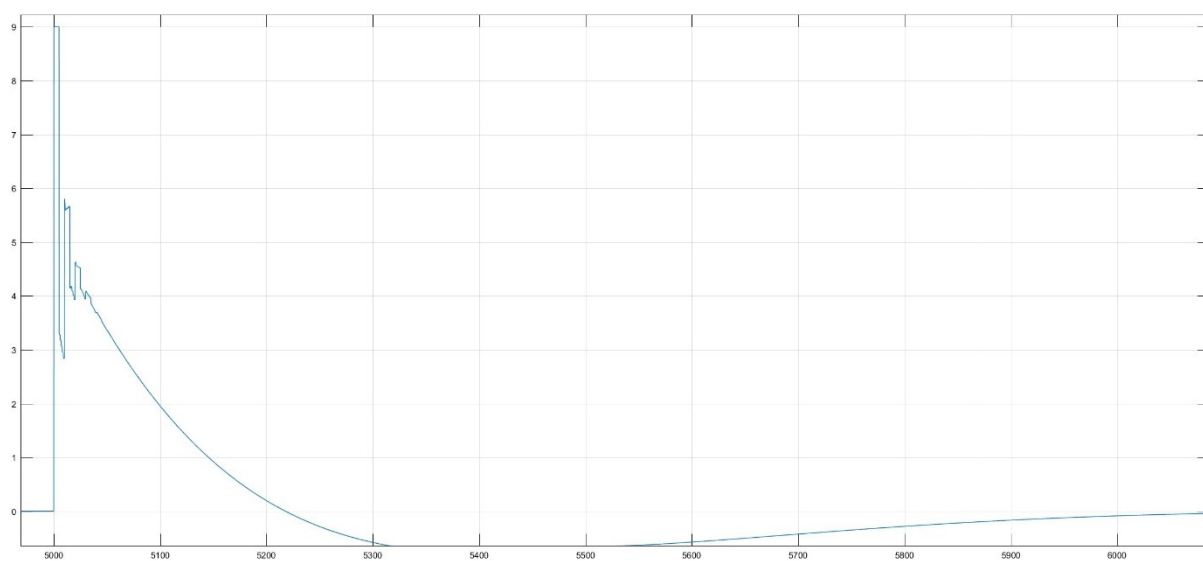
Obrázek 31 Opět požadavek -89 MVar, kdy není nutné tlumivku využít, díky přispění EDS



Obrázek 32 Požadavek na -120 MVar, což odpovídá maximálnímu vytížení regulovatelné tlumivky, které pomáhá synchronní kompenzátoř



Obrázek 33 Požadavek -120 MVar, kdy je tlumivka použita pouze na nejnižší stupeň a zbytek je na EDS a kompenzátoru



Obrázek 34 Požadavek na +180 MVar, je do 2 minut v požadovaných mezích, díky EDS a kompenzátoru

Všechny tyto průběhy nejsou nijak upraveny a odpovídají simulacím, které mohou reálně v přenosové soustavě nastat. Všechny ukázané průběhy se do 2 minut dostali do požadovaných mezí. Všechny tyto průběhy jsou probrány s konzultanty a po vzájemné dohodě, byly do práce zařazeny. V příloze jsou přiloženy v plné velikosti, včetně simulací jiných situačních rozdílů. X-ová osa nám vždy ukazuje čas a Y-ová osa nám ukazuje požadavek napětí v kV, který se následně pro potřeby řídicího PI regulátoru přepočte na jalový výkon, pro lepší doregulování.

## 7. Závěr diplomové práce

Cílem práce bylo navrhnout algoritmus pro řízení napětí v pilotním uzlu Krasíkov, na který je napojena i přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně. V práci jsou obecně shrnuty teoretické znalosti pro obecné pochopení této práce.

Teoretické podklady jsou čerpány z oficiálních zdrojů a jsou řádně citovány a označeny. Většinou se jednalo o skripta k výuce na naší univerzitě. Občas se ve zdrojích objevují technické cizojazyčné články, které byly mnou přeloženy a snažil jsem se vysvětlit jejich hlavní myšlenku.

Tato práce byla vypsána z důvodu nové instalace regulovatelné tlumivky do tohoto uzlu Přenosové soustavy a účelem je vytvořit algoritmus, který by tuto regulovatelnou tlumivku efektivně využíval.

Model je sestaven v programu MATLAB v podprogramu Simulink, ve kterém je samotný algoritmus obsažen a bude poskytnut pro řízení regulace napětí při efektivním využití regulovatelné tlumivky. Model je tvořen blokovým schéma, které je podrobně popsáno a jejich funkčnosti byli konzultováni vzhledem k funkčnosti v reálné síti.

Algoritmus zohledňuje velikosti odchylky a při větší odchylce se snaží doregulovat rychleji než při odchylce zanedbatelné. Algoritmus je plně funkční, ale doporučuji ji ho ještě v praxi drobně doladit, aby nedocházelo k nežádoucím jevům a bylo regulováno podle představ zadavatele. Algoritmus je sestaven tak, aby si hlídal i přiblížení k maximálnímu regulačnímu výkonu a snažil se všechny tři regulační členy využívat co nejefektivnější cestou.

Obecně se algoritmus sestavil na základě U/Q regulace, která je popsána v teoretické části a následně se podle citlivosti sítě přepočítal na změnu napětí, kterou daná změna toku jalového výkonu vyvolá.

V práci jsou vyobrazeny průběhy požadavku napětí, které vstupují do řídicího PI regulátoru, který jednoznačnými signály dává povel akčním členům, pro regulaci odpovídající velikosti povelu(signálu) z řídicího PI regulátoru, kterému je předřazen přepočet z napětí na jalový výkon, aby řídil jednotlivé akční členy a dával jim povel o velikosti požadované hodnoty jalového výkonu.

Průběhy jsou zobrazeny i v návaznosti, kdy se hodnoty mění diskrétně, aby bylo dobře vidět, rychlost regulace a schopnost tohoto algoritmu přesně regulovat napětí v pilotním uzlu. Jsou zde i průběhy, které jsou v reálné přenosové soustavě méně pravděpodobné a sice krajní hodnoty, například synchronního kompenzátoru samotného nebo s EDS. V průbězích je zřetelně vidět i kooperace akčních členů pro doregulování.

V algoritmu je možné díky ručně ovládanému ovladači měnit odbočky na transformátoru, ve kterém je v terciáru zapojen synchronní kompenzátor a tím se dá ovlivňovat i maximální velikost regulačního výkonu, kterou kompenzátor dodává do přenosové soustavy. Všechny průběhy v této práci jsou vyobrazeny, při zapojení transformátoru na 9. odbočku, vzhledem k odpovídající střední poloze přepínače odboček.

### Seznam literatury a informačních a ilustračních zdrojů

- [1] MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy, Praha Asociace energetických manažerů, 2013. 272 s. ISBN 9788026044611
- [2] EGÚ Praha Engineering, a.s. Automatic Secondary Regulation of Voltage and Usage of Reactive Power, [online] [www.egu-prg.cz](http://www.egu-prg.cz)
- [3] IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, New York IEEE, 2006. ISBN 978-1-5044-0855-4
- [4] KHORAMI, Mohammad. Application Fields and Control Principles of Variable Shunt Reactors with Tap-Changer. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2011
- [5] HABRYCH, Richard. Automatická sekundární regulace napětí. *Energetika* 5/2015 – vychází měsíčně. ISSN 0375-8842
- [6] HABRYCH, Richard – ŠKACH, Martin. Podpůrná služba regulace jalového výkonu. *Energetika* 6/2015 – vychází měsíčně. ISSN 0375-8842
- [7] RYCHLÝ, Oldřich. Provozní Instrukce Regulace U a Q v PS ČR. ČEPS a.s. 2020
- [8] MÁŠLO, Karel. Stabilita ES Síťový simulátor MODES. Prezentace zdroj: ČEPS a.s.
- [9] RUSEK, Stanislav. Skripta k předmětu Řízení a Stabilita Elektrizačních Soustav. VŠB, Ostrava
- [10] Technická dokumentace ČEPS a.s., Praha
- [11] EHRENBERGER, Jakub. Prezentace Elektrické Stanice ČEPS, Letní škola ČEPS, 2019
- [12] NAZARČÍK, Tomáš. Zapouzdřené rozvodny, Letní škola ČEPS, 2019
- [13] VRŠECKÝ, Jiří. Představení Dispečinku ČEPS, a.s., 2019
- [14] PISTORA, Martin. Rozvoj dispečerského řízení, Letní škola ČEPS, 2019
- [15] [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz) – informace o PS [online]
- [16] [oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]
- [17] [old.allforpower.cz](http://old.allforpower.cz) [online]
- [18] [cez.cz](http://cez.cz) [online]
- [19] [www.root.cz](http://www.root.cz) [online]
- [20] [vtm.zive.cz](http://vtm.zive.cz) [online]
- [21] [el-insta.cz](http://el-insta.cz) [online]
- [22] K. Dawood, G. Komurgoz and F. Isik, "Modelling of the Shunt Reactor by using Finite Element Analysis," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249363. ISBN 978-1-7281-6538-7

[23] S. Qiuqin, M. Yong, X. Tianxi, L. Yang, Z. Zhicheng and T. Fengbo, "Analysis and characterization of the shunt reactor switching over-voltages interrupted by SF6 circuit breakers with chopping current," *2014 International Conference on Power System Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 1234-1237, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993528. ISBN 978-1-4799-5032-4

[24] "IEEE Guide for the Application of Shunt Reactor Switching," in *IEEE Std C37.015-2009 (Revision of IEEE Std C37.015-1993)*, vol., no., pp.1-70, 12 Feb. 2010, doi: 10.1109/IEEESTD.2010.5415871. ISBN 978-0-7381-6169-3

[25] Fenfen Zhang, Tao Zheng, Ying Jin, Yanjie Zhao and Lianguang Liu, "Research on the applications of differential protection in TCT controllable shunt reactor," *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286353. ISBN 978-1-4673-8040-9